



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA DO AGREGADO DE BRITA 0
NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E HIDRÁULICAS DO
CONCRETO PERMEÁVEL DE CIMENTO PORTLAND**

Assis Fontana

Lajeado, julho de 2018

Assis Fontana

**INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA DO AGREGADO DE BRITA 0
NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E HIDRÁULICAS DO
CONCRETO PERMEÁVEL DE CIMENTO PORTLAND**

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Civil da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como parte da exigência para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Profa. Ma. Débora Pedroso Righi.

Lajeado, julho de 2018

Assis Fontana

**INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA DO AGREGADO DE BRITA 0
NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E HIDRÁULICAS DO
CONCRETO PERMEÁVEL DE CIMENTO PORTLAND**

A Banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como parte da exigência para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil:

Profa. Ma. Débora Pedroso Righi – orientadora
Universidade do Vale do Taquari - Univates

Prof. Dr. João Rodrigo Guerreiro Mattos
Universidade do Vale do Taquari - Univates

Profa. Ma. Carolina Becker Pôrto Fransozi
Universidade do Vale do Taquari - Univates

Lajeado, 10 de julho de 2018

RESUMO

A urbanização acelerada e desordenada é a principal responsável pelo agravamento de problemas relacionados às atividades hidrológicas em ambientes urbanos. Estradas, ruas e calçadas impermeabilizam o solo, acentuam o escoamento superficial e aceleram o acúmulo da água em áreas baixas, amplificando os efeitos das cheias. Pavimentos permeáveis são técnicas compensatórias alternativas e sustentáveis capazes de mitigar estes efeitos e, aliados a um revestimento permeável, apresentam potencial de infiltração superior ao ambiente anterior à urbanização. Assim, o presente estudo avaliou o comportamento mecânico e hidráulico de quatro traços de concreto permeável de cimento Portland, diferenciados apenas pela granulometria da brita 0, com o objetivo de alcançar a resistência e a permeabilidade mínimas exigidas pela NBR 16416:2015, para aplicação da técnica como revestimento de pavimentos permeáveis em áreas de tráfego de veículos leves e de pedestres. Foram realizadas análises do comportamento do concreto no seu estado fresco, através de ensaios de massa específica e Slump Test, e no estado endurecido, através de ensaios de resistência à tração na flexão, resistência à tração por compressão diametral, resistência à compressão, índice de vazios e permeabilidade através dos métodos de carga constante e de carga variável. As caracterizações mecânicas e hidráulicas foram realizadas em corpos de prova moldados e em corpos de prova extraídos, simulando a situação do concreto encontrado em campo. Após a análise dos resultados, concluiu-se que corpos de todos os traços estudados podem ser aplicados em locais de tráfego de pedestres, desde que moldados no local. Contudo, o traço que melhor aliou resistência e permeabilidade foi o traço T4, composto por brita 0 sem distinção granulométrica, com resistência à tração na flexão de 2,84 MPa e permeabilidade de 0,39 cm/s, condições superiores ao mínimo exigido pela supra aludida norma para aplicação também em vias de tráfego de veículos leves.

Palavras-chave: Concreto permeável. Pavimento. Escoamento superficial. Resistência.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me proporcionar todos os momentos que vivi durante a graduação, tanto os momentos bons, que me motivaram a continuar, como os momentos ruins, que contribuíram para o meu amadurecimento pessoal e profissional.

Agradeço à minha família pelo amor, apoio, incentivo e compreensão pelas inúmeras vezes que abdiquei da sua companhia para dar prosseguimento à graduação, em especial à minha namorada, Elisandra Cervi.

Agradeço à minha professora e orientadora Débora Pedroso Righi, pelo apoio, motivação, conhecimentos compartilhados e principalmente, por ter me ensinado a ser mais forte com os percalços da vida.

Agradeço aos funcionários do Laboratório de Tecnologia da Construção (LATEC) pelo apoio na execução dos experimentos.

Agradeço à Prefeitura Municipal de Boqueirão do Leão pelo apoio e compreensão em momentos que tive que me ausentar do trabalho. Agradeço também ao Setor de Engenharia que me acolheu e compartilhou conhecimentos na realização dos estágios.

Agradeço a todas as pessoas que participaram da minha vida acadêmica e na execução deste trabalho, como professores, colegas de aulas, colegas de trabalho, funcionários da universidade, pessoas que contribuíram direta e indiretamente em cada atitude ou palavras de incentivo, que me deram forças para continuar. Não cito nomes para não esquecer ninguém. Muito obrigado!

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Efeito da urbanização sobre a vazão das águas pluviais.....	15
Figura 2 – Diferentes composições de um pavimento permeável.....	17
Figura 3 – Composição de um pavimento revestido por cimento Portland permeável	19
Figura 4 – Concreto de cimento Portland permeável	23
Figura 5 – Tensões num pavimento	25
Figura 6 – Composição de um pavimento de cimento Portland permeável	26
Figura 7 – Pavimentos permeáveis	27
Figura 8 – Fluxograma do programa experimental.....	33
Figura 9 – Concreto permeável no estado fresco.....	39
Figura 10 – Verificação do ponto ideal do concreto permeável.....	40
Figura 11 – Verificação do ponto ideal do concreto permeável.....	41
Figura 12 – Análise de Slump Test no concreto permeável	43
Figura 13 – Extração de corpos de prova	45
Figura 14 – Corpos de prova cilíndricos moldados e extraídos.....	45
Figura 15 – Ensaio de tração na Flexão.....	48
Figura 16 – Disposição do corpo de prova no ensaio de tração pela compressão diametral	49
Figura 17 – Ensaio de permeabilidade segundo NBR 16416:2015.....	51
Figura 18 – Permeâmetro de carga variável	52

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Massa específica do concreto no estado fresco	54
Gráfico 2 – Índice de vazios dos corpos de prova moldados e extraídos.....	55
Gráfico 3 – Resistência à compressão dos corpos de prova moldados e extraídos .	57
Gráfico 4 – Resistência à tração de corpos de prova cilíndricos e prismáticos	58
Gráfico 5 – Correlação entre métodos de ensaio de resistência à tração	60
Gráfico 6 – Correlação entre massa específica x tração na flexão	60
Gráfico 7 – Comportamento mecânico e índice de vazios do concreto nos corpos de prova cilíndricos moldados	61
Gráfico 8 – Permeabilidade do concreto entre corpos de prova moldados, extraídos e a placa 1	62
Gráfico 9 – Correlação entre permeabilidade e índice de vazios.	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resistência mecânica e espessuras mínimas do concreto permeável....	24
Tabela 2 – Traços típicos de concreto drenante	31
Tabela 3 – Características do cimento Portland CP IV-32 RS	34
Tabela 4 – Composição granulométrica da brita 0	35
Tabela 5 – Características físicas e químicas da sílica ativa	35
Tabela 6 – Dosagem do traço do concreto permeável.....	37
Tabela 7 – Massa unitária do agregado e quantidade necessária para moldagem dos corpos de prova	38
Tabela 8 – Composição em massa (kg) do traço do concreto permeável.....	38
Tabela 9 – Ensaios realizados e quantificação dos corpos de prova.....	41

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Justificativa da pesquisa	11
1.2 Delimitação da pesquisa.....	12
1.3 Objetivos	12
1.3.1 Objetivo geral	12
1.3.2 Objetivos específicos.....	12
1.4 Estrutura do trabalho	13
 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	 14
2.1 Urbanização e drenagem	14
2.2 Pavimentos permeáveis.....	15
2.3 Tipos de pavimentos permeáveis	17
2.4. Concreto permeável de cimento Portland.....	19
2.4.1 Vantagens e desvantagens	20
2.4.2 Materiais usualmente utilizados	20
2.5 Estudos sobre o tema	25
 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	 32
3.1 Materiais.....	33
3.1.1 Aglomerante	33
3.1.2 Agregado.....	34
3.1.3 Adições	35
3.1.4 Água	35
3.2 Estratégias da Pesquisa	36
3.3 Dosagem	36
3.3.1 Composição do traço.....	37
3.3.2 Procedimento de mistura	38
3.4 Corpos de prova e ensaios.....	41
3.5 Caracterização do concreto no estado fresco	42
3.6 Moldagem e cura dos corpos de prova	43
3.7 Extração de testemunhos	44
3.8 Índice de vazios	46
3.9 Resistência à compressão	46
3.10 Resistência à tração.....	47
3.10.1 Resistência à tração na flexão	47
3.10.2 Resistência à tração por compressão diametral	48

3.11 Permeabilidade	50
3.11.1 Permeabilidade segundo NBR16416:2015	50
3.11.2 Permeabilidade por carga variável	52
 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	 54
4.1. Massa específica	54
4.2 Índice de vazios	55
4.3 Resistência à compressão	56
4.4 Resistência à tração.....	58
4.5 Permeabilidade	62
 5 CONCLUSÕES	 64
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	65
 REFERÊNCIAS.....	 67
 APÊNDICE	 72
APÊNDICE A – Detalhamento dos resultados	73

1 INTRODUÇÃO

Por diversos anos o manejo das águas pluviais foi tratado com certo descaso pelas autoridades públicas. Contudo, o crescimento urbano acelerado e desordenado modificou a qualidade do ambiente e vem afetando negativamente as atividades hidrológicas deste espaço. Conforme Santos (2012), a urbanização é a principal responsável pela incidência de tragédias geotécnicas ocorridas em períodos de cheias, resultando em constantes prejuízos econômicos e sociais. Para Araújo *et al.* (2000), ações mitigadoras com visão sustentável são os grandes desafios da sociedade moderna para auxiliar na redução de problemas com drenagem urbana.

Para Miguez *et al.* (2016), o escoamento superficial da água da chuva é agravado pela impermeabilização do solo por pavimentos, telhados e calçadas, acelerando o acúmulo em talvegues, rios e zonas baixas. Quando a vazão de escoamento é menor que a vazão recebida, os cursos de água enchem e, por vezes, transbordam, inundando áreas baixas e várzeas, afetando diretamente a população.

Soluções públicas para manejo das águas pluviais consistem basicamente na implantação de sistemas de canalização. Para Acioli (2005), estes sistemas atuam apenas sobre o efeito e não sobre a causa do problema, contribuindo ainda com a aceleração do escoamento, transferindo o problema para outro ponto à jusante na bacia hidrográfica. Para Hölitz (2011), os pavimentos permeáveis são sistemas eficientes e sustentáveis que atuam justamente sobre a causa, contribuindo com a redução e/ou retardamento do escoamento, minimizando os efeitos das cheias.

No Brasil, a NBR 16416:2015 regulamenta a execução de pavimentos permeáveis e estabelece condições mínimas de desempenho para que possa ser aplicado em áreas de tráfego leve e de pedestres. Porém, como a técnica é relativamente nova e considerada de alto custo no país, ainda é tratada com certa desconfiança, carecendo de estudos mais aprofundados.

1.1 Justificativa da pesquisa

Pontos de armazenamento de água e incremento de infiltração são técnicas compensatórias alternativas que devem ser implantadas para reverter os impactos ambientais causados pelo crescimento urbano. Pavimentos permeáveis cumprem esta finalidade, proporcionando também vantagens econômicas e ambientais, com ampliação do conforto térmico, acústico e da segurança.

Para maior eficiência, o pavimento permeável deve estar aliado a um revestimento permeável. Segundo estudos efetuados por Araújo *et al.* (2000), o revestimento de concreto permeável de cimento Portland permite infiltração da água a taxas elevadas, superiores inclusive aos locais não urbanizados. Embora Höltz (2011) afirme que a aplicação desta tecnologia seja bastante difundida em países como Estados Unidos, França e Japão, no Brasil este tema ainda carece de estudos mais aprofundados para o domínio da técnica.

Estradas, ruas e calçadas são alguns dos principais agentes amplificadores das cheias por ocuparem grande parcela do solo e serem construídos justamente para serem impermeáveis. Assim, a presente pesquisa visa o estudo da técnica para desenvolvimento de um traço de concreto permeável de cimento Portland com variação da granulometria do agregado de brita 0, para implantação em áreas de tráfego leve e de pedestres, que atenda as condições impostas pela NBR 16416:2015, com o propósito de auxiliar na amortização do escoamento superficial de áreas urbanas.

1.2 Delimitação da pesquisa

O presente trabalho está delimitado à concepção de quatro traços de concreto permeável de cimento Portland, com variação da composição do agregado de brita 0, para análise do desempenho mecânico e hidráulico, conforme exigências estabelecidas pela NBR 16416:2015.

1.3 Objetivos

A seguir serão apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos do presente trabalho, entendidos como necessários para o sucesso da pesquisa.

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa consiste em comparar as características mecânicas e hidráulicas de concretos permeáveis com os valores mínimos estabelecidos por norma para aplicação deste material em vias de tráfego leve e/ou de pedestres.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Caracterizar os materiais que constituem um concreto permeável;
- Avaliar as características mecânicas do concreto permeável através de ensaios laboratoriais de compressão e tração na flexão;
- Avaliar o desempenho hidráulico através de ensaios de infiltração, permeabilidade e índice de vazios;
- Avaliar a influência da variação granulométrica da brita 0 na permeabilidade e na resistência do concreto;
- Comparar o desempenho mecânico e hidráulico entre corpos de prova moldados e corpos de prova extraídos.

1.4 Estrutura do trabalho

O presente trabalho aborda, em seu capítulo 2, a revisão bibliográfica acerca da necessidade de implantação de dispositivos de infiltração de água em centros urbanos, a evolução histórica da utilização de pavimentos permeáveis pelo mundo, a composição de um pavimento permeável e a análise de trabalhos de pesquisa relacionados aos diversos tipos de revestimentos empregados e traços de concreto permeável estudados. No capítulo 3, estão apresentados os materiais utilizados e a metodologia adotada para moldagem de diferentes traços de concreto permeável de cimento Portland, descrevendo os procedimentos de cálculo e ensaios realizados para obtenção dos resultados. O capítulo 4 apresenta os resultados e discussões, e o capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas pela presente pesquisa e as sugestões de estudos para aplicação em futuros trabalhos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Urbanização e drenagem

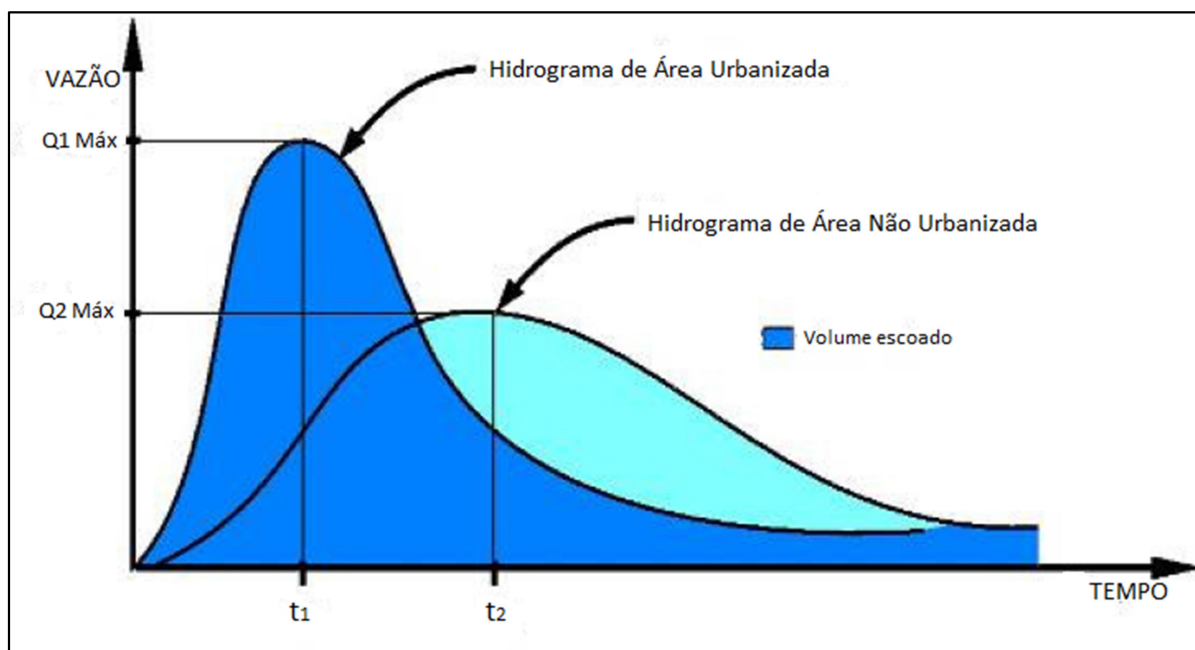
Um dos principais desafios da administração pública é a gestão das águas pluviais em ambientes urbanos. Este problema existe desde que o homem passou a organizar-se em núcleos, porém em maior proporção nos dias atuais. Segundo Miguez *et al.* (2016), até meados do ano 3000 a.C. o homem vivia exclusivamente da agricultura e plantava o necessário para sua sobrevivência. Com o passar do tempo alguns indivíduos dedicaram-se a outras atividades, e os agricultores passaram a produzir alimentos para suas famílias e também para estes indivíduos, surgindo assim alguns povoados.

Estes povoados cresceram basicamente no entorno de rios, devido à presença da água utilizada para irrigação, dessedentação e navegação, e pela presença de terras férteis utilizadas para atividades agrícolas, resultando nas primeiras cidades. Nas regiões mais baixas já existiam problemas relacionado à inundação, porém a população entendia que era um “preço a pagar” por usufruir dos benefícios trazidos pelo curso hídrico (Baptista *et al.* 2005).

Com o passar do tempo, a crescente urbanização acentuou a impermeabilização do solo, e os cursos de água passaram a ser canalizados e retificados através de programas de drenagem urbana. Estes programas são compreendidos como um conjunto de atividades, instalações e infraestrutura para transporte, retenção ou detenção de águas da chuva, sendo até os dias atuais a principal ferramenta de gestão pluvial (ARAÚJO *et al.*, 2000). Para Acioli (2005), o segredo da redução do escoamento por estes sistemas está na aceleração do

processo, porém isso causa picos de vazão em curto período de tempo, gerando maiores inundações. O hidrograma esquemático representado na Figura 1, desenvolvido por Virgiliis (2009), demonstra o pico de vazão em curto período de tempo que ocorre em áreas urbanizadas, contrapondo a uma vazão mais lenta em áreas não urbanizadas.

Figura 1 – Efeito da urbanização sobre a vazão das águas pluviais



Fonte: Adaptado de Virgiliis (2009).

Para mitigar os efeitos da urbanização, são necessárias aplicações de técnicas de retenção e infiltração da água, com ampliação de redes de drenagem, bacias de detenção e restauração de calhas naturais, como medidas estruturais de controle de cheias (BAPTISTA *et al.*, 2005). Para Canholi (2005), medidas individuais também podem ser adotadas, como aplicação de dispositivos de infiltração, telhados armazenadores, reservatórios subterrâneos e pavimentos permeáveis, tornando as edificações sustentáveis e eficientes contra as enchentes.

2.2 Pavimentos permeáveis

Os pavimentos tradicionais de concreto asfáltico e de cimento Portland são os principais elementos causadores da impermeabilização do solo por serem construídos justamente para serem impermeáveis, de fato a proteger seus

componentes da umidade que contribui com a degradação do pavimento e com a consequente redução de sua capacidade de carga (SUZUKI *et al.*, 2013).

Segundo Miguez *et al.* (2016), o primeiro país que verificou a necessidade de desenvolver medidas de controle de escoamento foi a França, por volta de 1945, e produziu o primeiro pavimento permeável, porém não obteve êxito devido à baixa qualidade do ligante asfáltico e ao elevado índice de vazios da mistura. Vinte anos mais tarde, passou novamente a ser implantado em países como Suécia, Estados Unidos, França e Japão. Desenvolvido certo domínio da técnica, os pavimentos permeáveis passaram a ser aplicados em diversos pontos de tráfego leve e áreas de lazer, alcançando resultados efetivos na redução do escoamento e ampliação do conforto térmico e acústico. Na cidade de Bordeaux, na França, o pavimento permeável foi aplicado em vias de tráfego significativo, como vias de contorno da cidade, quebrando paradigmas de aplicação deste tipo de revestimento em áreas de tráfego pesado.

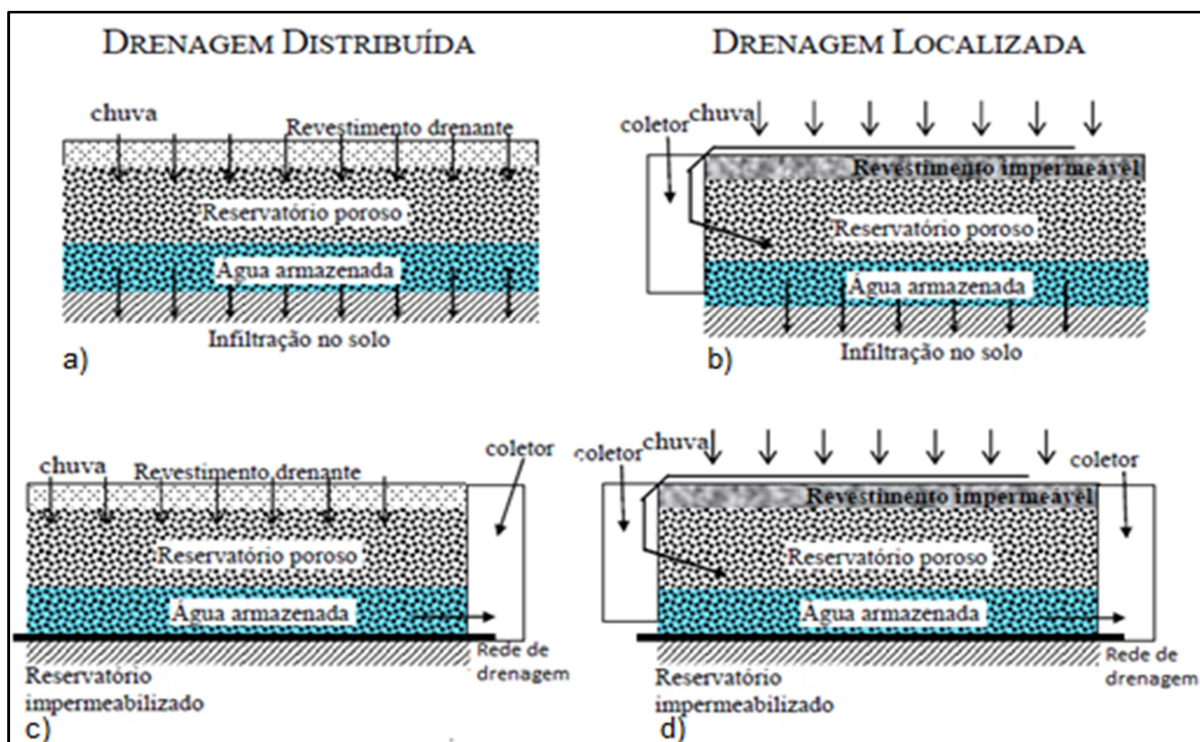
Para a *American Concrete Pavement Association* (2006), a estrutura de um pavimento permeável apenas cumprirá sua finalidade se forem atendidos os seguintes requisitos:

- Promover o pré-tratamento da água na camada de revestimento do pavimento, no momento da infiltração;
- Promover o tratamento natural da água no reservatório, em meio às pedras que fazem o suporte (base) do pavimento;
- Encaminhar a água armazenada para o solo e/ou para a rede de drenagem de forma eficiente;
- Verificar o paisagismo ao redor do local de implantação, devendo evitar a presença de materiais que possam sedimentar sobre a superfície;
- Realizar a manutenção do pavimento de forma preventiva e corretiva a fim de prolongar sua vida útil, sendo este o mais importante ponto a ser observado.

2.3 Tipos de pavimentos permeáveis

A Figura 2 apresenta as diferentes concepções de pavimentos permeáveis, e o respectivo funcionamento hidráulico de cada um.

Figura 2 – Diferentes composições de um pavimento permeável



Fonte: Azzout *et al.* (1994 apud ACIOLI 2005).

No pavimento com drenagem distribuída, a infiltração ocorre pelo revestimento drenante, podendo ser auxiliada por coletores. Em pavimentos com drenagem localizada, a água é recolhida exclusivamente através de coletores, uma vez que o revestimento é impermeável. Para ambas as situações, a destinação final poderá ser realizada diretamente para o solo, dependendo de sua permeabilidade, ou então para a rede de drenagem. Para Acioli *et al.* (2005), o corpo do pavimento poderá ser constituído de forma semelhante para ambas as situações, com a utilização de brita com granulometria mais espessa na base, que atua também como reservatório, onde o volume de vazios determinará a capacidade de armazenamento da água.

Segundo a NBR 16416:2015, a água infiltrada em um pavimento permeável poderá ser destinada totalmente para o solo, caso sua permeabilidade seja superior a 10^{-3} m/s. Caso a permeabilidade do solo for entre 10^{-3} e 10^{-5} m/s, a destinação da

água deverá ser realizada para o solo e para a rede de drenagem. Se a permeabilidade do solo for inferior a 10^{-5} m/s, ou o lençol freático se encontre a menos de um metro da camada inferior da base, ou ainda, sejam encontrados contaminantes no subleito, a água infiltrada deverá ser totalmente encaminhada para a rede de drenagem. O dimensionamento das camadas também é abrangido pela referida norma, porém não impede a aplicação de outros métodos de dimensionamento, desde que sejam considerados os períodos de retorno de precipitações extremas para um período mínimo de dez anos e com duração mínima de uma hora.

A camada superficial de um pavimento permeável poderá ser impermeável, em concreto ou asfalto, semipermeável, em blocos de concreto ou paralelepípedos, ou permeável, com aplicação de concreto de cimento Portland poroso ou concreto asfáltico poroso (ACIOLI *et al.*, 2005).

Segundo a NBR 16416:2015, o concreto de cimento Portland pode ser aplicado de diversas formas no revestimento de um pavimento permeável, podendo ser no formato de peças impermeáveis, com juntas alargadas ou áreas vazadas, no formato de peças ou placas de concreto permeável, ou ainda, em concreto permeável moldado diretamente na obra, desde que atinjam coeficiente de permeabilidade mínimo de 0,1 cm/s, pelo método de ensaio detalhado no item 3.11.1.

Revestimentos constituídos por peças impermeáveis são considerados permeáveis por permitirem a passagem da água por entre as peças. Os blocos de concreto vazado apresentam elevado índice de permeabilidade, pois necessitam de grande quantidade de material drenante na superfície. Ambos são construídos sobre base composta por areia, que permite infiltração da água a elevadas taxas. Porém, para Araújo *et al.* (2000) e Marchioni e Silva (2010), um revestimento em concreto permeável de cimento Portland devidamente dosado, aplicado diretamente sobre um pavimento corretamente dimensionado e construído, apresenta o maior potencial de infiltração da água.

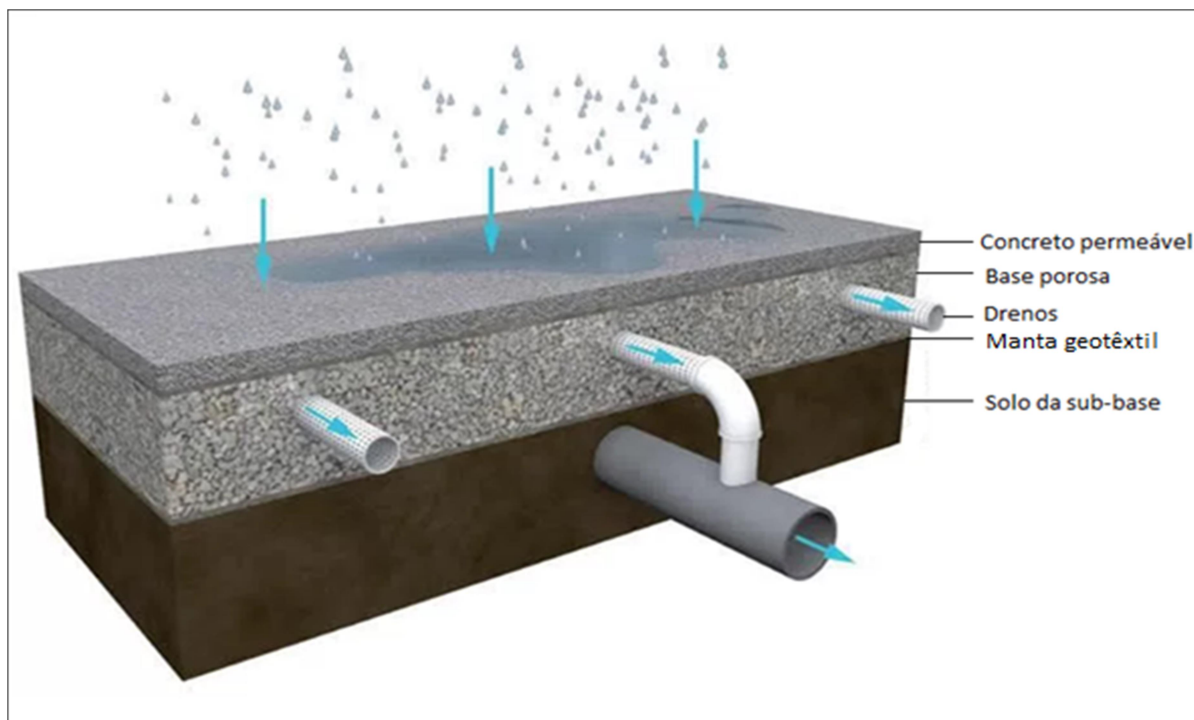
O concreto asfáltico, também conhecido no Brasil como concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), é constituído pela mistura de agregados de graduação

densa, onde a combinação de materiais de semelhante granulometria resulta em uma mistura com poucos vazios (BERNUCCI *et al.*, 2008). Para a execução do concreto asfáltico poroso (CPA), é aplicado agregado graúdo pouco graduado com dosagem adequada de ligante asfáltico, resultando em grande quantidade de vazios interligados, responsáveis pela permeabilidade do pavimento.

2.4. Concreto permeável de cimento Portland

Um pavimento tradicional revestido por cimento Portland permeável está representado na Figura 3. Para Acioli (2005), este tipo de pavimento é constituído basicamente pelo revestimento drenante, sobreposto a uma camada de base porosa, composta por material de espessa granulometria. Pode possuir drenos para condução da água, dependendo da permeabilidade do solo base, e manta geotêxtil, para proteção contra a percolação de finos, promovendo também certa filtração da água.

Figura 3 – Composição de um pavimento revestido por cimento Portland permeável



Fonte: Adaptado de Civilização Engenharia, 2017 (texto digital).

Segundo Santos (2012), o pavimento apresentado na Figura 3 pode permitir a infiltração da água em taxas de até 300 l/m²/min. Porém, para Baptista *et al.* (2005),

a capacidade de infiltração está relacionada a diversos fatores, como o nível do lençol freático, a declividade do terreno e com a permeabilidade do solo-base. Normas americanas citam que se o solo for de boa permeabilidade, a água leva em torno de três dias para chegar ao lençol freático, caso contrário o reservatório deve ser dimensionado considerando períodos de retorno de chuvas extremas. Para Alessi (2006), a manta geotêxtil deve ser adicionada em solos de baixa capacidade de infiltração, pois impede o bombeamento de finos pela estrutura do pavimento. Neste caso, se faz necessária a implantação de tubos de drenagem que promovam a destinação da água para a rede pública.

2.4.1 Vantagens e desvantagens

Segundo Dong *et al.* (2010) e Mehta e Monteiro (2014), os benefícios do concreto permeável em relação ao concreto convencional são:

- a) Segurança: Os vazios resultantes permitem a passagem da água e reduzem o escoamento superficial, minimizando riscos de aquaplanagem. O atrito pneu-pavimento é melhorado pela presença de agregados graúdos angulares e arredondados na superfície, ampliando o potencial de frenagem e tração dos veículos, reduzindo também a formação de sprays que atrapalham a visibilidade e minimizando riscos de acidentes em condições de mau tempo;
- b) Meio-ambiente: Contribuição na recarga do lençol freático, na limpeza urbana, e no crescimento da vegetação nas áreas adjacentes;
- c) Economia: Redução de medidas para controle do escoamento da água, redução de desastres ambientais e redução de redes de drenagem;
- d) Conforto: Redução da sensação de calor e abafamento nos grandes centros devido à reduzida retenção de calor se comparado ao concreto convencional. O desempenho acústico também é destacado, uma vez que o grande volume de poros interconectados são altamente efetivos na absorção acústica, minimizando a geração de ruídos no atrito entre os pneus e o pavimento.

As principais preocupações com a aplicação do concreto permeável estão relacionadas com a resistência à abrasão e ao cisalhamento em áreas de manobra, curvas e cargas de tráfego repetidas, pois o contato reduzido entre os elementos minoram sua resistência, podendo causar sérias patologias (DONG *et al.*, 2010). Para Mehta e Monteiro (2014), baixas resistências, prolongados tempos de cura, sensibilidade à água, cuidados com o solo base, necessidade de manutenções frequentes e imprecisão sobre a propriedade de durabilidade estão entre as principais desvantagens para utilização do concreto permeável.

Segundo Virgiliis (2009), a colmatção é um fenômeno que pode comprometer a capacidade de infiltração do concreto, pois partículas sedimentadas sobre o pavimento podem ser carregadas para o seu interior, promovendo o entupimento dos poros. Este processo pode ser benéfico do ponto de vista que há filtração e retenção de poluentes, contudo, a percolação não será mais permitida e o pavimento perde sua finalidade ao passo que os vazios são totalmente preenchidos pelos materiais finos. Para evitar este problema, Baptista *et al.* (2005) citam que o pavimento deve ter tratamento especial relacionado à limpeza e conservação, com emprego de lavadores de alta pressão e equipamentos especiais de aspiração, com frequência média de cinco anos. Além disso, estas medidas podem não impedir por completo a colmatção da estrutura sendo necessário, nesse caso, reconstruir o pavimento.

Os custos de construção de pavimentos permeáveis ainda são considerados elevados no Brasil, porém estão sendo reduzidos, à medida que sua utilização se torna mais frequente e novas técnicas e métodos de aplicação são desenvolvidos (BAPTISTA *et al.*, 2005).

2.4.2 Materiais usualmente utilizados

Os materiais utilizados na mistura do concreto permeável de cimento Portland são os mesmos do concreto convencional, tais como cimento Portland, agregados (grauído e/ou miúdo), água, aditivos e adições.

O cimento Portland é composto por cal, sílica, alumina e óxido de ferro, que juntos correspondem a cerca de 95% do produto. Outros materiais que podem aparecer na composição são magnésia e óxidos, que somados, constituem os outros 5% do produto final (BAUER, 2000). Conforme Mehta e Monteiro (2014), o cimento é um material seco, fino, que não possui propriedades aglomerantes por si só. O cimento passa a ser aglomerante devido à reação entre seus componentes com a água, passando assim por um processo de hidratação, resultando em um produto resistente à própria água, por isso também chamado de cimento hidráulico.

Aditivos químicos são regulamentados pela NBR 11768:2011. Segundo Batezini (2013), um aditivo tradicionalmente utilizado no concreto convencional, que pode ser aplicado no concreto permeável é o aditivo superplastificante. Composto por surfactantes aniônicos de cadeia longa e grupos polares de hidrocarbonetos, são capazes de reduzir significativamente a tensão superficial da água, elevando a fluidez e a trabalhabilidade do material.

É possível reduzir o consumo de água em até 30% e a resistência do concreto no estado endurecido poderá ser elevada em semelhante percentual. Caso ocorra adição superior ao necessário, o mesmo não causará qualquer inconveniente ao concreto, pois o aditivo perde sua qualidade básica minutos após a sua aplicação (BAUER, 2000). Porém, Batezini (2013) salienta que a utilização de aditivo superplastificante em concreto permeável deve ser cautelosa, tendo em vista que a segregação da pasta tende a ocorrer com maior facilidade, se acumulando por gravidade na parte inferior do revestimento, tornando-o impermeável.

Os agregados compõem cerca de 70% do volume do concreto produzido mundialmente, portanto, deve-se dar total atenção em relação à qualidade dos agregados que farão parte da mistura (NEVILLE e BROOKS, 2013). Segundo Virgiliis (2009), os agregados graúdos utilizados na produção de concreto permeável podem ser cascalhos, pedra britada, resíduos da construção civil, seixos, materiais reciclados, dentre outros. Segundo Tennis *et al.* (2004), como o agregado miúdo é normalmente descartado, a utilização de agregado graúdo de semelhante granulometria proporciona um baixo envolvimento entre os componentes da mistura, resultando nos vazios que são fundamentais para a infiltração da água. A NBR 7211:2009 define como agregado graúdo os grãos que passam pela peneira de 75

mm e são retidos na peneira de 4,75 mm. Diâmetros inferiores a estes já passam a ser considerados como agregado miúdo.

Concretos permeáveis de cimento Portland moldados com brita 0 e brita 1 possuem índice de vazios na ordem de 15 a 30%, com poros entre 2 e 8 mm de espessura, que permitem a passagem de água a altas taxas de vazão (CANHOLI, 2005). Devido a isso, alcançar as resistências mínimas exigidas não é tarefa fácil. Para Mehta e Monteiro (2014), adições minerais devem ocorrer, pois ampliam o desempenho mecânico do concreto, contribuem na redução do calor de hidratação e reduzem, conseqüentemente, a fissuração térmica. Adições minerais promovem também o melhor preenchimento dos poros na ligação entre os componentes, proporcionando ao concreto maior resistência, proteção contra a corrosão e durabilidade.

As propriedades do concreto no estado fresco e endurecido também podem ser alteradas pela adição de materiais químicos, com a finalidade de produzir algum efeito específico e desejável, tanto no concreto convencional como no permeável. Isso tudo, para que o concreto apresente resistência mecânica desejável, aliada à permeabilidade, que é obtida através da exclusão parcial ou total do agregado miúdo. A Figura 4 demonstra a permeabilidade do concreto moldado por Monteiro (2010), com utilização de agregado graúdo de brita 1.

Figura 4 – Concreto de cimento Portland permeável



Fonte: Monteiro (2010).

Apesar da aparente fragilidade podem ser alcançadas, com práticas construtivas ideais, resistências à compressão superiores a 20 MPa, desde que o concreto seja submetido à compactação e cura adequadas, com adições químicas e minerais como sílica ativa, escória de alto-forno e cinza volante de carvão, todos com capacidade de potencializar o desempenho mecânico do material resultante. Este concreto poderá ter durabilidade entre 20 e 40 anos com poucas manutenções (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A Tabela 1, extraída da NBR 16416:2015, apresenta as resistências mecânicas e espessuras mínimas que devem ser utilizadas em peças de concreto permeável ou concreto permeável moldado no local da obra.

Tabela 1 – Resistência mecânica e espessuras mínimas do concreto permeável

Revestimento	Solicitação	Espessura mínima (mm)	Resistência mínima (MPa)	Método de ensaio
Peça de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60	20	Compressão (NBR 9781:2013)
	Tráfego leve	80		
Concreto permeável moldado no local	Tráfego de pedestres	60	1	Tração na flexão (NBR 12142:2006)
	Tráfego leve	100	2	

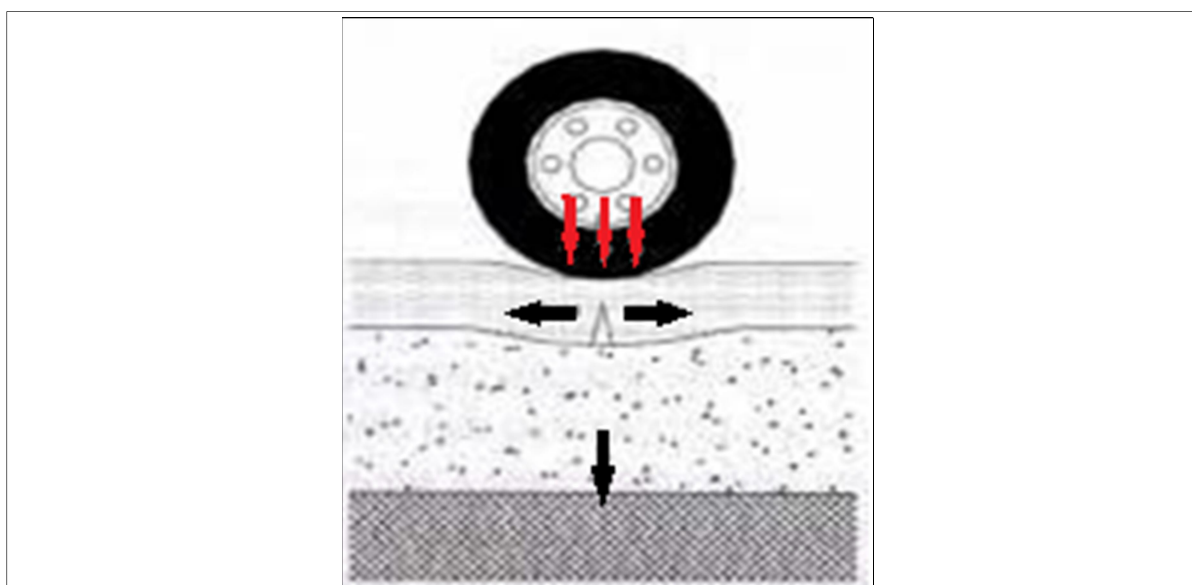
Fonte: Adaptado de NBR 16416:2015.

Conforme Tabela 1, peças de concreto permeável poderão ser aplicadas em locais de tráfego de pedestres e de veículos leves, desde que possuam resistência mínima à compressão de 20 MPa e espessuras mínimas de 6 cm e 8 cm, respectivamente. Para concreto moldado no local da obra, a resistência deverá ser ensaiada pelo método de tração na flexão, segundo NBR 12142:2006, e deverá ser de no mínimo 1 MPa com espessura mínima de 6 cm para aplicação em locais de tráfego de pedestres, ou resistência e espessura mínimas de 2 MPa e 10 cm para aplicação no tráfego de veículos leves, classificada pela NBR 16416:2015 como local onde o volume diário médio de veículos (VDM) como motocicletas, motonetas, triciclos, quadriciclos, automóveis e caminhonetes seja de até 400, além de VDM de até 20 para veículos pesados, como caminhões e ônibus.

As resistências exigidas pela NBR 16416:2015 são necessárias para que o revestimento permeável suporte as cargas de tráfego. Segundo Medina e Motta

(2015), o tráfego impõe ao revestimento uma carga de compressão na interface entre o pneu e o pavimento, enquanto na outra face ocorre o efeito de tração do concreto. Assim, nas peças de concreto permeável com pequenas dimensões o efeito da compressão é mais influente, enquanto no concreto moldado em única peça e com grandes dimensões o efeito de tração é verificado, uma vez que o tráfego promove a flexão do revestimento, conforme ilustra a Figura 5. A observância das espessuras e resistências mínimas exigidas é essencial para que o revestimento tenha a durabilidade pretendida.

Figura 5 – Tensões num pavimento



Fonte: Adaptado de Medina e Motta (2015).

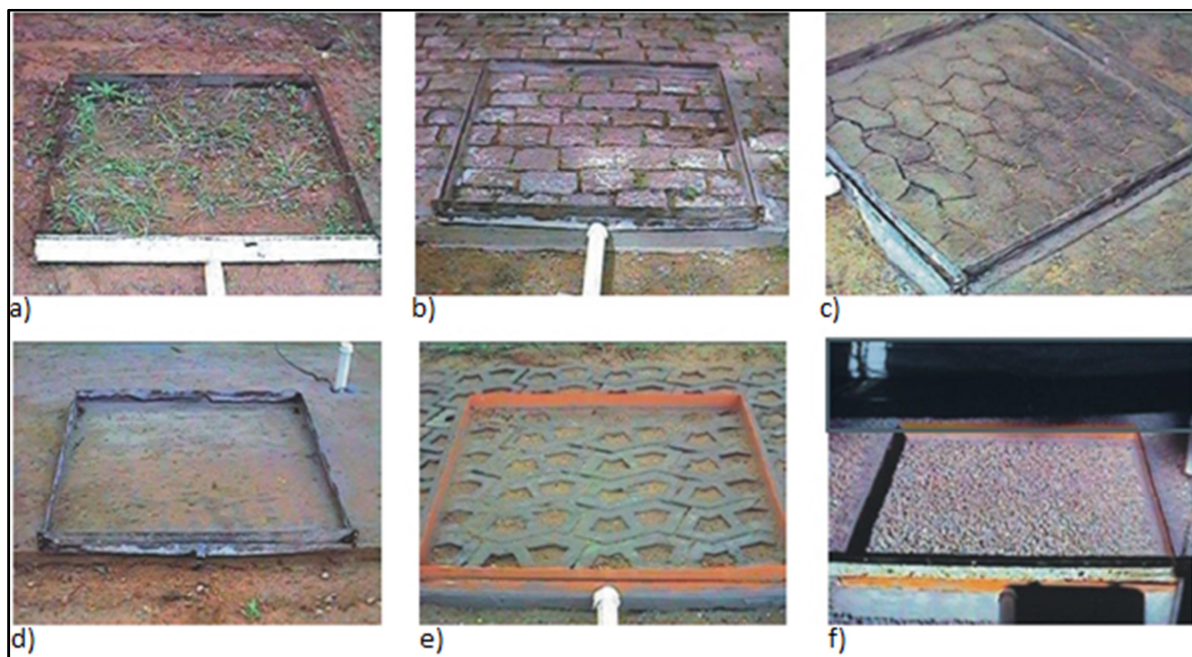
2.5 Estudos sobre o tema

A aplicação desta tecnologia é bastante recente no país, porém está em constante crescimento. A dosagem do concreto permeável pode ser obtida por métodos de tentativa e erro desenvolvidos em laboratório ou por mecanismos empíricos, com objetivo de alcançar equilíbrio ideal entre agregados e pasta para obtenção de teor de vazios, trabalhabilidade, permeabilidade e resistência desejada (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Araújo *et al.* (2000) analisaram o desempenho hidráulico de revestimentos tradicionalmente utilizados (Figura 6), que são:

- Solo compactado com vegetação rasa, para obtenção de parâmetros pré-urbanização (a);
- Dois pavimentos semipermeáveis, um constituído de paralelepípedos de granito (b) e o outro de blocos de concreto do tipo “pavi S” conhecido por blocket (c), ambos construídos sobre um reservatório de brita 3, com juntas preenchidas por areia;
- Pavimento impermeável de concreto de cimento Portland tradicional (d);
- Dois pavimentos considerados permeáveis, o primeiro constituído de blocos de concreto vazado preenchidos com areia (e), e o segundo constituído de concreto poroso de cimento Portland (f), de traço 1:6, sem finos, com agregado de granito de dimensões entre 9,5 a 19 mm (brita 1), ambos construídos sobre um reservatório de brita 3 compactada.

Figura 6 – Composição de um pavimento de cimento Portland permeável



Fonte: Araújo *et al.* (2000).

Segundo os autores, o escoamento superficial em pavimentos impermeáveis é potencializado em 44% quando comparado ao solo compactado, ratificando a teoria de Virgiliis (2009), que afirma que as cheias são impulsionadas pela impermeabilização do solo. Em relação às superfícies semipermeáveis, identificou-se o acréscimo de 22% no escoamento superficial dos blocos de concreto, e 11% nos paralelepípedos, em relação ao solo compactado. A simulação realizada no

pavimento permeável de blocos vazados preenchidos com areia praticamente não gerou escoamento superficial, enquanto o concreto permeável não apresentou escoamento superficial algum, ambos superando a capacidade de infiltração do solo. Assim, os autores concluíram que o pavimento de concreto permeável de cimento Portland devidamente dimensionado é o revestimento mais eficiente em relação à infiltração da água, superando inclusive as condições anteriores à urbanização.

Virgiliis (2009) comparou o desempenho de pavimentos permeáveis em uma área de 1.600 m² de estacionamento de veículos leves na cidade de São Paulo/SP. Em metade desta área o autor aplicou revestimento composto por blocos intertravados de concreto poroso, e na outra metade aplicou revestimento asfáltico poroso (CPA), ambos combinados a uma base porosa. A área de estudo está representada na Figura 7.

Figura 7 – Pavimentos permeáveis



Fonte: Virgiliis (2009).

O pavimento revestido por CPA apresentou permeabilidade de 0,4 cm/s e índice de vazios de ordem de 20,1%. Os blocos de concreto poroso apresentaram melhor desempenho, com permeabilidade de 0,5 cm/s e índice de vazios superior a 21%.

Tennis *et al.* (2004) analisaram a relação entre água e cimento (a/c) do concreto permeável, e constataram que a composição ideal pode variar de 0,27 até 0,34. Holtz (2011), promoveu análise da resistência à compressão em traços de concreto permeável de cimento Portland, com relação entre cimento e agregado de 1:5, 1:7 e 1:9, compostos por agregado de brita 1, variando apenas a relação a/c em 0,26, 0,30, 0,35 e 0,45. Concluiu que o comportamento do concreto permeável não é similar ao convencional, pois constatou maiores resistências nas faixas 0,30 e 0,35. Para Lian e Zhuge (2010), os melhores resultados de resistência à compressão e permeabilidade foram obtidos com relação a/c de 0,32, porém esta variável está diretamente relacionada aos materiais empregados.

O controle da água empregada no concreto permeável é de fundamental importância, devendo ser própria inclusive para o consumo humano. Os agregados adicionados devem estar em condições próximas de saturado, evitando assim a absorção da água. A adição da água deve ocorrer vagarosamente até que se perceba um brilho na mistura, sendo este o ponto ideal do concreto no estado fresco (TENNIS *et al.*, 2004).

Em uma segunda etapa, Holtz (2011) moldou concreto permeável de traço 1:5, com a adição de brita 0 e pequenas quantidades de areia. Analisou também traços 1:4 com agregado de brita 1, brita 1 com adição de 7% de areia e brita 0, todos com relação a/c de 0,30. Foram moldados corpos de prova cilíndricos e blocos de concreto permeável, para extração de testemunhos. Ao analisar o desempenho do concreto de brita 0 e de brita 1 entre corpos de prova moldados, o autor constatou que a brita 0 proporcionou ganhos de resistência à compressão devido ao maior contato entre agregados. A adição de areia também contribuiu para um leve ganho de resistência.

Em relação à extração de corpos de prova, o autor constatou redução de permeabilidade. A resistência também foi minorada nos corpos de prova extraídos, exceto para a brita 1, onde a moldagem de corpos de prova cilíndricos não acondicionou devidamente o agregado. Segundo o autor, a extração de corpos de prova apresenta comportamento mais próximo do real, pois este tipo de concreto é usualmente aplicado em grandes quantidades e com maior espaço para o alojamento da brita.

Os efeitos da vibração também foram analisados por Holtz (2011), que reproduziu os mesmos traços de 1:4, com relação a/c de 0,30, porém com diferentes formas de adensamento. A primeira moldagem foi realizada sem adensamento, a segunda moldagem foi adensada através de mesa vibratória, e a terceira por vibrador do tipo agulha. Os ganhos de resistência com mesa vibratória foram elevados, alcançando 18 MPa, porém ocasionaram o entupimento dos poros, reduzindo a permeabilidade. A não utilização de vibração alcançou apenas 4,4 MPa de resistência e acarretou em problemas com a extração de corpos de prova devido à baixa conexão entre as partículas, problema este potencializado na extração dos corpos de prova de brita 0, danificando a superfície do concreto. A utilização de vibrador do tipo agulha resultou em resistência intermediária, com 8,54 MPa, e proporcionou boa permeabilidade, se comparado à mesa vibratória, sendo a melhor alternativa dentre as ensaiadas. O autor concluiu ainda que resistências superiores a 20 MPa com permeabilidade superior a 0,1 cm/s poderão ser alcançadas em traços 1:4 e 1:5, compostos por agregados de brita 0, desde que aplicada alguma forma de adensamento.

Castro (2015) avaliou o desempenho do concreto permeável composto por brita 0, com traços 1:4, 1:3,6 mais 10% de areia e sem compactação, 1:3 e 1:3,6 mais 10% de areia, com compactação por soquete Marshall. Em relação à resistência mecânica, o traço compactado pelo soquete Marshall apresentou o melhor desempenho, chegando a 8,37 MPa, comparado aos 4,64 MPa de resistência obtido no traço de mesma composição, porém sem compactação. Em relação à permeabilidade, todos os traços apresentaram permeabilidade superior ao mínimo de 10^{-3} m/s, exigido pela NBR 16416:2015. Para Suleiman *et al.* (2006), os corpos de prova cilíndricos podem ser compactados em três camadas, com a aplicação de 15 golpes de soquete Marshall em cada uma. Este aparelho é composto por um martelo de 4,5 kg e uma haste guia que permite seu livre deslocamento em queda livre de 45 cm.

Segundo Tennis *et al.* (2004), a energia de compactação ideal para o concreto permeável é de 0,07 MPa. A forma de compactação mais simples realizada em obra é com rolos. Imediatamente após a colocação do concreto o mesmo deve ser compactado com rolos de aço em duas direções perpendiculares, garantindo a compactação adequada de forma simples e sólida. Outro método de compactação é

realizado por chapas vibratórias, comumente utilizadas devido à sua simplicidade e rapidez, porém limitado a pequenas áreas. Ainda segundo o autor, deve-se dar atenção especial à frequência de vibração que, caso ocorra de forma inadequada, poderá ocasionar a redução de vazios e/ou o rasgo do concreto. Uma terceira forma de compactação, considerada mais rápida, é realizada por compactadores de placas, porém a uniformidade da compactação depende muito do operador.

Lian e Zhuge (2010) adicionaram ao concreto permeável 7% de sílica ativa e 0,8% de aditivo superplastificante, verificando ganhos de resistência tanto à tração como à compressão. Nesta linha, Mallmann (2017) moldou três traços de concreto permeável de brita 1 com relação entre aglomerante e agregados de 1:4,44, com relação a/c de 0,3. No primeiro traço não ocorreram adições, no traço 2 foi adicionado 0,7% de aditivo superplastificante, enquanto no traço 3 foram adicionados os mesmos 0,7% de aditivo superplastificante mais 10% de sílica ativa. O traço 2 apresentou aumento de resistência mecânica de em torno de 10%, e o traço 3 resultou em ganhos de resistência de em torno de 35%, ambos quando comparados ao traço 1.

Mariano (2014) analisou o desempenho do concreto permeável moldado com agregado de brita 0. Um primeiro traço foi composto por granulometria contínua, com dimensões de 4,75, 6,3 e 9,5 mm, outro composto por agregados com dimensões de 4,75 e 6,3 mm, e um terceiro traço composto por agregados com granulometria de 6,3 e 9,5 mm, empregando variações no teor de argamassa em frações entre 30 e 55%. O concreto moldado com granulometria contínua de 4,75, 6,3 e 9,5 mm com teor de argamassa de 42% apresentou o melhor desempenho, com resistência à compressão de 35,23 MPa e permeabilidade de 0,143 m/s, ambos superiores aos valores exigido pela NBR 16416:2015.

Seis diferentes traços, com relação cimento e agregado de 1:4 e 1:5, em brita 0, brita 1 e mistura de brita 1 com 5% de areia, todos com relação a/c de 0,30, foram moldados por Jahn (2016). O autor constatou que as resistências mecânicas da brita 0 foram superiores às da brita 1, motivados pelo maior contato entre os elementos e identificando boa ligação entre agregado e pasta. Em relação à permeabilidade, todos os traços apresentaram resultados superiores ao mínimo estabelecido pela norma, com destaque para o traço 1:5 com brita 1, com 1,25 cm/s.

Monteiro (2010) empregou traços de concreto permeável de 1:3 e 1:4, com granulometria entre 12,5 e 2,35 mm, sem compactação. Para o traço 1:3, a autora empregou a relação a/c 0,26 e encontrou índice de vazios de 15,25%, resistência à compressão média de 9,39 MPa, e resistência à tração na flexão de 0,90 MPa. Para o traço 1:4, a relação a/c empregada foi de 0,30 e o índice de vazios encontrado foi de 16,67%, com resistência média à compressão de 10,7 MPa, e resistência à tração na flexão de 0,50 MPa. As resistências não alcançaram o valor mínimo para aplicação em locais de tráfego de pedestres, comprovando a necessidade de compactação e/ou adensamento do material. A autora não realizou ensaios quantitativos de permeabilidade.

A Tabela 2, desenvolvida por Mehta e Monteiro (2014), apresenta faixas típicas utilizadas na produção de concretos permeáveis. Aditivos químicos que alterem a trabalhabilidade e tempo de pega também podem ser empregados.

Tabela 2 – Traços típicos de concreto drenante

Materiais	Proporções (Kg/m³)
Cimento	270 a 415
Agregado	1190 a 1480
Relação agregado/cimento	3 a 5,5
Relação água/cimento	0,27 a 0,34
Relação agregado miúdo/agregado graúdo	0 a 1

Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014).

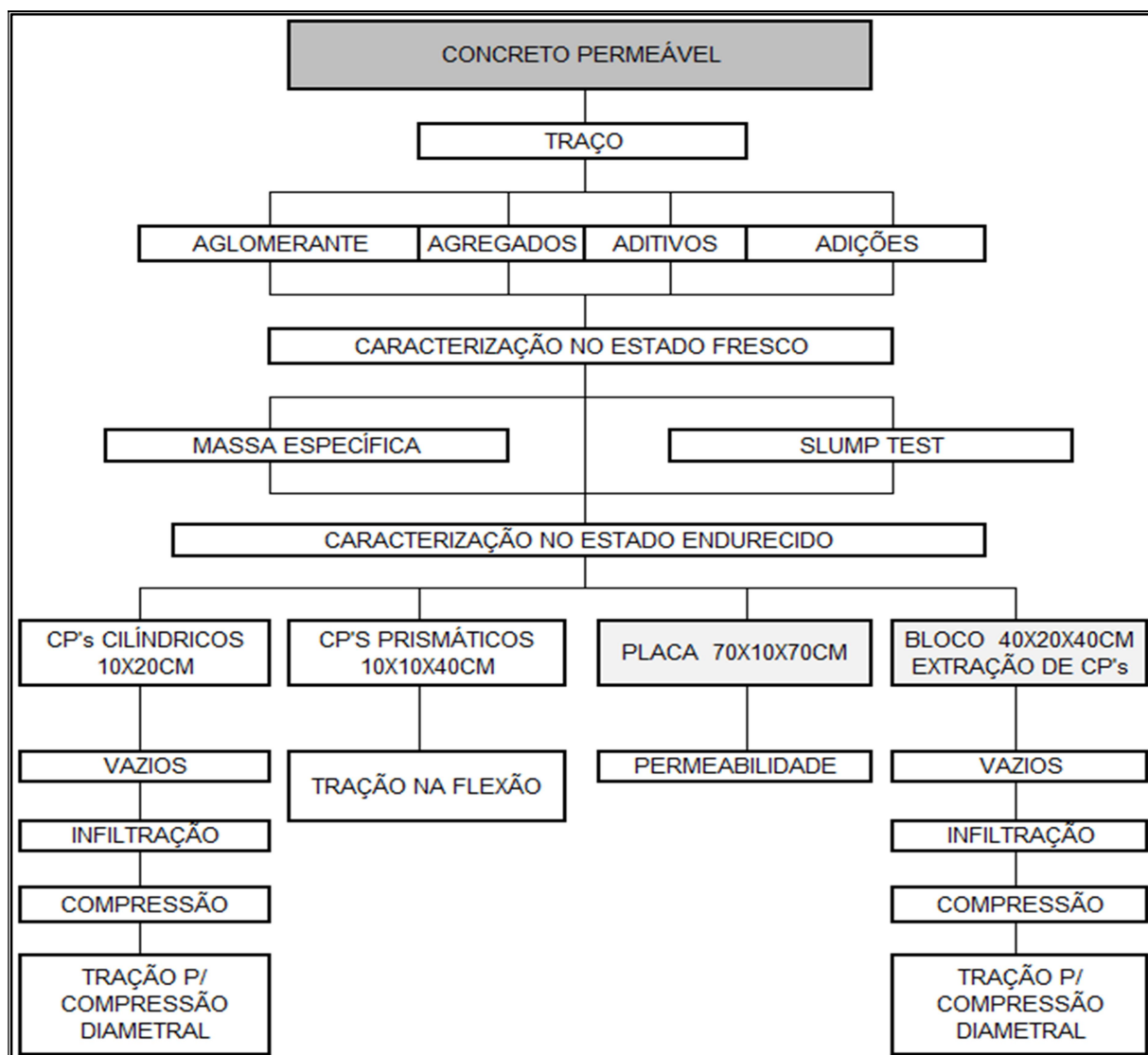
Grande parte dos traços de concreto permeável de cimento Portland analisados no referencial bibliográfico apresentaram quantitativo de materiais dentro das faixas estabelecidas por Mehta e Monteiro (2014), e apresentaram resistência mecânica e permeabilidade superiores ao mínimo exigido pela NBR 16416:2015 para aplicação do material em vias de tráfego de pedestres, e em alguns casos, em vias de tráfego de veículos leves.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este programa experimental foi planejado com objetivo de analisar a resistência mecânica e o desempenho hidráulico do concreto de cimento Portland permeável, variando apenas a granulometria do agregado de brita 0.

A Figura 8 apresenta o fluxograma de planejamento do presente estudo. Este planejamento partiu da definição de um traço e dos componentes que fizeram parte do concreto. Estas definições se deram através da análise do referencial bibliográfico, onde foram identificados os experimentos que apresentaram bons resultados, aliando resistência e permeabilidade. Posteriormente, foram identificados os corpos de prova e os respectivos ensaios necessários, realizados para verificação das características do concreto proposto, tanto no estado fresco como no estado endurecido.

Figura 8 – Fluxograma do programa experimental



Fonte: O autor (2018).

3.1 Materiais

A seguir, estão identificados e caracterizados todos os materiais adicionados na mistura do concreto permeável.

3.1.1 Aglomerante

O cimento Portland é o aglomerante mais conhecido mundialmente, que ao entrar em contato com a água promove reações químicas dos seus componentes, dando resistência e durabilidade ao produto resultante (ABCP, 2002).

O aglomerante utilizado no concreto permeável do experimento foi o cimento Portland do tipo CP IV-32 RS, produzido e comercializado pela InterCement Brasil. Este cimento é indicado para concretos permeáveis devido a sua resistência a meios agressivos e ao ataque de agentes químicos como sulfatos e cloretos, poluentes trazidos pela água que, impreterivelmente, se farão presentes no interior do concreto. As principais características do cimento utilizado estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Características do cimento Portland CP IV-32 RS

Características do aglomerante	
Tipo	Cimento Portland CP IV-32 RS
Resistência à compressão 28 dias	32 MPa
Teor de pozolana (%)	$15 < t < 50$
Tempo de pega (h)	$1 \leq t \leq 12$
Estado físico	Sólido, cinza e sem cheiro

Fonte: InterCement Brasil (Adaptado).

3.1.2 Agregado

Tennis *et al.* (2004) salienta que graduação aberta com ausência de finos proporciona grande permeabilidade, porém não apresenta condições satisfatórias de conforto e estética. Assim, uma graduação mais estreita é indicada, desde que apresente as condições mínimas de desempenho exigidas pela NBR 16416:2015.

O agregado utilizado é composto por pedra de basalto britada em pequenos diâmetros, identificada como brita 0, sendo matéria prima abundantemente encontrada na região do Vale do Taquari/RS e na cidade de Lajeado/RS. A distribuição granulométrica foi realizada através de peneiras com abertura de malha padronizada pela NBR NM 248:2003. A composição granulométrica apresentada na Tabela 4 consistiu no peneiramento de uma amostra de 1 kg de brita 0, onde o material retido em cada uma das peneiras foi pesado. O módulo de finura aproximado da brita 0 aplicada no ensaio é de 6,75, com diâmetro máximo de partícula de 9,5 mm.

Tabela 4 – Composição granulométrica da brita 0

Peneira (mm)	Massa média retida (g)	Retido (%)	Acumulado (%)
12,5	0,00	0,00	0,00
9,5	9,20	0,92	0,92
6,3	245,70	26,57	27,49
4,75	323,80	32,38	59,87
2,36	369,50	34,95	94,82
1,18	28,00	2,80	97,62
Fundo	23,80	2,38	100

Fonte: O autor (2018).

3.1.3 Adições

A sílica ativa utilizada é produzida e comercializada pela empresa Dow Corning Silício do Brasil. A utilização deste produto, a uma taxa entre 5 e 12% em relação a massa do aglomerante, melhora as características tanto no estado fresco quanto endurecido dos concretos e argamassas. Este produto reage com o hidróxido de cálcio que está presente na pasta de cimento Portland, diminuindo a porosidade na conexão entre os elementos. A Tabela 5 detalha informações técnicas acerca do produto utilizado.

Tabela 5 – Características físicas e químicas da sílica ativa

Características da sílica ativa	
Fabricante	Dow Corning
Massa específica	~ 2.220 kg/m ³
Superfície específica	~ 19.000 m ² /kg
Formato da partícula	Esférico
Diâmetro médio da partícula	0,20 µm

Fonte: Dow Corning (adaptado).

3.1.4 Água

A água utilizada na produção do concreto permeável é distribuída pela Companhia Corsan no município de Lajeado/RS e, segundo o distribuidor, sua potabilidade está dentro dos padrões exigidos pela Portaria nº 2914/2011 para consumo humano.

3.2 Estratégias da Pesquisa

Foram produzidos quatro traços de concreto permeável, com variação apenas da granulometria da brita 0. Para cada traço, foram moldados sete corpos de prova cilíndricos, padronizados pela NBR 5739:2007, com dimensões de 10 x 20 cm, utilizados para ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, índice de vazios e condutividade hidráulica. Foram produzidos também três corpos de prova prismáticos 10 x 10 x 40 cm, conforme NBR 16416:2015, para ensaio da resistência à tração na flexão, e uma placa com as dimensões de 70 x 10 x 70 cm para ensaio de permeabilidade.

Para cada traço, foi moldado também um bloco com dimensões de 40 x 20 x 40 cm, utilizado para extração de quatro corpos de prova cilíndricos (testemunhos), com dimensões 10 x 20 cm, utilizados para ensaios de condutividade hidráulica, resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e índice de vazios, para posterior comparação com os resultados obtidos nos corpos de prova moldados.

3.3 Dosagem

O traço bruto adotado para o presente trabalho foi de 1:4,08, relação entre a massa de cimento com o agregado de brita 0 e a sílica ativa. Este traço foi adotado através da análise do referencial teórico, constatando que ele poderia proporcionar a resistência e permeabilidade mínimas exigidas pela NBR 16416:2015.

A variação dos traços deste programa experimental ocorreu no diâmetro do agregado, classificado segundo sua composição granulométrica. O traço T1 foi composto por 50% de agregado graúdo passante na peneira de 9,5 mm e retido na peneira 6,3 mm e 50% de agregado passante na peneira 6,3 mm e retido na peneira de 4,75 mm. O traço T2 foi composto por 50% de agregado passante na peneira de 9,5 mm e retido na peneira 6,3 mm, e 50% de agregado passante na peneira 4,75 mm e retido na peneira 2,36 mm. O traço T3 foi composto por 50% de agregado passante na peneira 6,3 mm e retido na peneira 4,75 mm e 50% de agregado passante na peneira 4,75 mm e retido na peneira 2,36 mm, e o traço T4 foi

composto por brita 0 sem distinção de faixa granulométrica. Foram utilizadas a mesmas quantidades de sílica ativa e a mesma relação a/c para os quatro traços, conforme Tabela 6.

Tabela 6 – Dosagem do traço do concreto permeável¹.

Traço	Cimento CP IV-32	Agregado (%)			Adições	
		9,5 a 6,3 mm	6,3 a 4,75 mm	4,75 a 2,36 mm	a/c*	Sílica*
T1	1	50	50	-	0,36	8%
T2	1	50	-	50	0,36	8%
T3	1	-	50	50	0,36	8%
T4	1	Brita 0			0,36	8%

Fonte: O autor (2018).

3.3.1 Composição do traço

A quantidade de cada material foi determinada segundo o volume de concreto necessário para moldar os corpos de prova estipulados. O ensaio da massa unitária do agregado de brita 0 foi realizado para determinar a quantidade de brita necessária para compor do traço e, em função dela, mensurar os demais componentes. A massa unitária é a relação entre a massa de um agregado e o seu volume ocupado. Conforme determina a NBR NM 45:2006, um recipiente de volume e massa conhecidos foi preenchido até que estivesse completamente cheio. O material excedente foi arrasado, e o cilindro foi pesado, para determinar a massa de cimento. Posteriormente, foi aplicada a Equação 1.

$$M\mu = ma/V \quad (1)$$

Onde:

$M\mu$: Massa Unitária (kg/m³);

ma : Massa do agregado (kg);

V : Volume ocupado (m³);

¹ Quantidades estimadas em relação à massa de cimento.

Os valores de massa unitária do agregado de brita 0 podem ser observados na Tabela 7, bem como as quantidades necessárias para o preenchimento de todos os corpos de prova previstos.

Tabela 7 – Massa unitária do agregado e quantidade necessária para moldagem dos corpos de prova

Granulometria (mm)	Volume rec. (m³)	Massa Brita (Kg)	Massa unitária (kg/m³)	Concreto (m³)	Quantidade de Brita (Kg)
9,5 - 6,3	0,0053	6,790	1.281,03	0,08	102,48
6,3 - 4,8	0,0053	6,615	1.248,01	0,08	99,84
4,8 - 2,4	0,0053	6,510	1.228,20	0,08	98,26
Brita 0	0,0053	6,840	1.290,46	0,08	103,24

Fonte: O autor (2018).

Em posse da massa de brita necessária e em função do traço adotado, foram determinadas as quantidades de materiais que compõem cada traço de concreto permeável, conforme demonstra a Tabela 8.

Tabela 8 – Composição em massa (kg) do traço do concreto permeável

Traço	Cimento	Agregado			Sílica Ativa (8%)	Água (a/c=0,36)
		9,5-6,3 mm	6,3-4,8 mm	4,8-2,4 mm		
T1	25,29	51,24	49,92	-	2,02	9,10
T2	25,09	51,24	-	49,13	2,01	9,03
T3	24,76	-	49,92	49,13	1,98	8,91
T4	25,81	103,24			2,06	9,29

Fonte: O autor (2018).

Prevvia-se inicialmente uma relação a/c de 0,30, contudo, esta relação apresentou um concreto relativamente seco, sendo necessária a adição de uma quantidade um pouco maior de água. Isso ocorreu em virtude de que as referências analisadas não incorporaram em seus traços a sílica ativa, que aumentou o teor de finos em 8%, carecendo do acréscimo de água em semelhante percentual, resultando na relação a/c de 0,36.

3.3.2 Procedimento de mistura

Um fator que difere o concreto permeável do concreto convencional é o processo de mistura dos elementos. No concreto permeável, os controles dos

componentes devem ser mais rigorosos para que se obtenham os resultados desejados (TENNIS *et al.*, 2004).

O procedimento de mistura adotado foi desenvolvido por Schaefer (2006). Inicialmente, o autor moldou concreto permeável nos mesmos moldes do concreto convencional, onde o agregado e a água são primeiramente misturados, e após é adicionado cimento. Porém este processo não apresentou bons resultados no ensaio de compressão, pois o autor identificou fragilidade na junção entre a pasta e o agregado. Esta deficiência foi ocasionada pela saturação do agregado graúdo, que liberou água após a adição do cimento e, por ser uma mistura relativamente seca, fragilizou a região de contato entre os elementos. Então o autor criou um método de mistura que melhorou a ligação entre o agregado e a pasta, tendo em vista que a ruptura no ensaio à compressão ocorreu no agregado.

Este método, que também foi aplicado no presente trabalho, consistiu na adição de todo o agregado graúdo, seguido de 5% da massa do cimento e misturados por 1 minuto, até o agregado ser revestido pelo cimento. Logo após, foi adicionada a água, o cimento restante e a sílica, misturando por três minutos, deixando descansar por três minutos e novamente misturando por mais dois minutos, resultando no concreto apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Concreto permeável no estado fresco

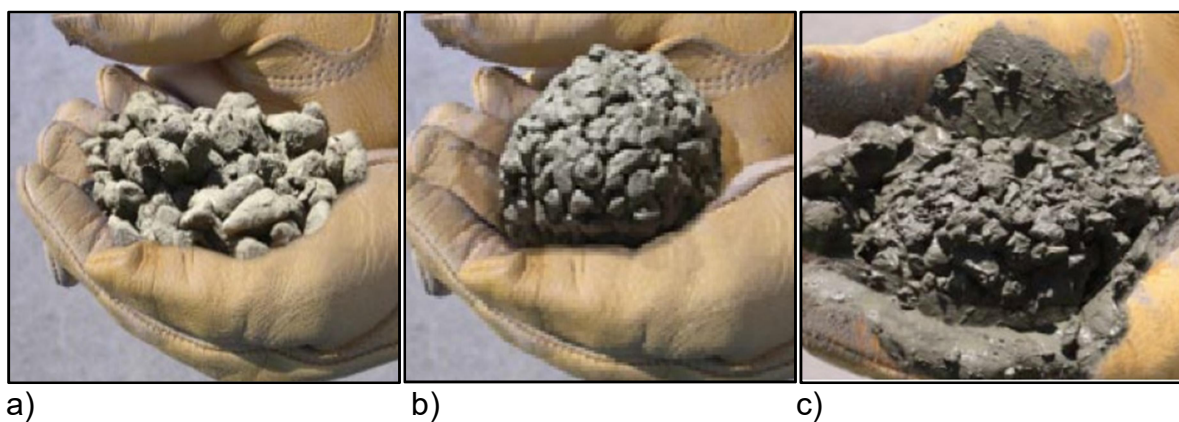


Fonte: O autor (2018).

Uma técnica criada por Tennis *et al.* (2004), utilizada para verificar o ponto ideal do concreto no estado fresco, consiste em pegar um punhado de concreto e, ao abrir a palma da mão, o mesmo deverá permanecer agrupado em forma semelhante a uma bola, sem desagregar nem a pasta fluir entre os vazios, demonstrando assim que o concreto possui coesão e/ou plasticidade suficientes para aplicação.

A Figura 10 apresenta as três situações que podem ser obtidas na mistura do concreto permeável. A imagem à esquerda (a), consiste em uma mistura relativamente seca, com baixa coesão entre as partículas, que desagregam facilmente. A imagem central (b), apresenta concreto em condições ideais, com coesão suficiente entre os elementos que permaneceram unidos, sem que a pasta fluísse entre eles. A representação à direita (c), consiste em uma mistura com alta relação a/c, onde a pasta está fluindo entre os elementos, preenchendo os vazios entre os componentes da mistura.

Figura 10 – Verificação do ponto ideal do concreto permeável



Fonte: Adaptado de Tennis *et al.* (2004).

Seguindo esta técnica, conforme demonstra a Figura 11, ao pegar uma amostra do concreto misturado neste estudo, os elementos permaneceram unidos, apresentando boa coesão entre os componentes, muito se assemelhando ao concreto ideal produzido por Tennis *et al.* (2004).

Figura 11 – Verificação do ponto ideal do concreto permeável



Fonte: O autor (2018).

3.4 Corpos de prova e ensaios

A Tabela 9 apresenta os ensaios realizados para avaliação das características mecânicas e hidráulicas do concreto permeável, bem como as quantidades de amostras ensaiadas. Os ensaios de resistência mecânica do concreto foram realizados 28 dias após a moldagem dos corpos de prova, e os demais ensaios foram realizados após este período.

Tabela 9 – Ensaio realizados e quantificação dos corpos de prova²

Ensaio	Corpos de Prova	Moldados			Extraídos		
		T1	T2	T3	T1	T2	T3
Massa específica e Slump Test	Concreto fresco	-	-	-	-	-	-
Resistência à Compressão	Cilíndricos	3	3	3	2	2	2
Índice de vazios	Cilíndricos	2*	2*	2*	2*	2*	2*
Infiltração de água	Cilíndricos	2*	2*	2*	2*	2*	2*
Tração por compressão diametral	Cilíndricos	2	2	2	2*	2*	2*
Tração na flexão	Prismáticos	3	3	3	-	-	-
Permeabilidade	Placa 1	1	1	1	-	-	-

Fonte: O autor (2018).

² Ensaio com os mesmos corpos de prova.

3.5 Caracterização do concreto no estado fresco

Segundo NBR 16416:2015, a análise das condições do concreto no estado fresco moldado no local se faz necessária, através do ensaio de massa específica. Contudo, foi aplicado também o ensaio de abatimento em tronco de cone (Slump Test).

A avaliação da massa específica do concreto foi obtida através da relação entre o peso de concreto e seu volume ocupado. A análise consistiu na moldagem do concreto em recipiente com volume de 5 dm³, compactado em duas etapas com 20 golpes do soquete Marshall por camada. Para a obtenção da massa específica foi aplicada a Equação 2.

$$\mu = m/v \quad (2)$$

Onde:

μ : Massa específica no estado fresco (Kg/m³);

m : Massa do concreto (Kg);

v : Volume ocupado (m³).

O valor mínimo de massa específica exigida pela norma é de 1600 kg/m³, independente do projeto. Segundo Tennis *et al.* (2004), concretos permeáveis podem apresentar massa específica entre 1300 e 2000 kg/m³, enquanto concretos convencionais podem apresentar até 2800 kg/m³ de massa específica.

O Slump Test é um ensaio de caracterização do concreto no estado fresco disciplinado pela NBR NM 67:1998, utilizado para verificação do abatimento do concreto, permitindo assim analisar sua trabalhabilidade. O ensaio consiste na adição de uma amostra do concreto em uma fôrma tronco-cônica alocada sobre uma placa metálica. A fôrma foi preenchida em três camadas, com aplicação de 25 golpes de haste de compactação cada uma, sem atingir a camada inferior. O excedente foi raspado com régua e o cone retirado, conforme Figura 12.

Figura 12 – Análise de Slump Test no concreto permeável



Fonte: O autor (2018).

Para Jahn (2016), aplicação deste ensaio no concreto permeável não é viável, tendo em vista que no momento da retirada do cone o concreto desmorona. Contudo, conforme pode ser observado na Figura 12, o concreto permaneceu no formato do cone, com abatimento zero, ratificando as condições satisfatórias de desempenho verificadas pelo método de Tennis *et al.* (2004), pois a elevada coesão entre os componentes mantiveram o concreto na posição inicial.

3.6 Moldagem e cura dos corpos de prova

Os corpos de prova cilíndricos foram moldados em três camadas e compactados com 10 golpes de soquete Marshall por camada. Os demais corpos de prova também foram compactados com a mesma relação entre volume e golpes, onde corpos de prova prismáticos foram moldados em duas camadas com 25 golpes cada, o bloco para extração de corpos de prova foi moldado em três camadas com 200 golpes cada camada e a placa utilizada para ensaio de permeabilidade foi moldada em uma camada, compactada com 620 golpes.

Segundo a Sika, empresa originária da Suíça, desenvolvedora de produtos da área da construção civil e produtora de concreto permeável, a aplicação do concreto deve ser de no máximo 15 minutos para reduzir a perda de umidade que, devido à grande presença de vazios, tende a ser maior que o concreto convencional. É recomendada também a adição de material plástico na superfície do concreto pelos primeiros sete dias de cura, auxiliando na retenção de umidade, prolongando assim o tempo de hidratação dos materiais cimentícios.

Três dias após a concretagem, os corpos de prova prismáticos e cilíndricos foram desformados e encaminhados à câmara úmida para continuação do processo de cura, conforme NBR 9479:1994. A câmara úmida é um ambiente isolado termicamente, com manutenção da temperatura em 23°C, com variação permitida de até 2°C, e umidade relativa do ar mínima de 95%. Este ambiente tem a finalidade de manter umidade na superfície dos corpos de prova estocados por todo o período da cura. Esta situação é entendida como ideal para a cura do concreto com objetivo de alcançar maiores resistências.

A placa moldada para ensaio de permeabilidade e o bloco utilizado para extração de corpos de prova permaneceram revestidos por lona plástica. Após o sétimo dia da concretagem a lona plástica foi recolhida, o concreto foi desformado e restante do processo de cura se deu em condições climáticas e de ambiente semelhantes às encontradas em canteiro de obras.

3.7 Extração de testemunhos

A extração dos testemunhos, realizada nos blocos apresentados na Figura 13, foi realizada segundo NBR 7680:2015, através de equipamento extrator provido de cálice e coroa diamantada, com refrigeração a água e vibração reduzida, a fim de obter corpo de prova o mais paralelo possível entre o topo e a base, sem apresentar ondulações ou quaisquer imperfeições.

Figura 13 – Extração de corpos de prova



Fonte: O autor (2018).

Foram extraídos quatro corpos de prova de cada bloco, considerados suficientes para a realização dos ensaios pretendidos. Após a extração, constatou-se que os corpos de prova se mantiveram íntegros, com superfícies paralelas, sem apresentar fissuras aparentes, considerados ideais para realização dos ensaios pretendidos. A Figura 14 apresenta um corpo de prova cilíndrico moldado (a) e corpo de prova cilíndrico extraído (b).

Figura 14 – Corpos de prova cilíndricos



a) Moldado

Fonte: O autor (2018).



b) Extraído

3.8 Índice de vazios

Segundo Canholi (2005), a variabilidade do índice de vazios está atrelada às características dos materiais que compõem a mistura, podendo oscilar de 15% até 30%, tendo influência direta no desempenho mecânico e hidráulico do concreto permeável.

O índice de vazios foi determinado através da relação entre a massa dos corpos de prova cilíndricos no estado seco e submerso, volume da amostra e o peso específico da água, conforme Equação 3.

$$V = 1 - \left(\frac{w_2 - w_1}{P_w \cdot vol} \right) \quad (3)$$

Onde:

V : Índice de vazios;

w_1 : Peso submerso (Kg);

w_2 : Peso seco (Kg);

P_w : Massa específica da água (kg/m^3);

vol : Volume da amostra (m^3).

3.9 Resistência à compressão

Corpos de prova cilíndricos foram utilizados para ensaios da resistência à compressão e executados conforme NBR 9781:2013. O equipamento utilizado para os ensaios de resistência do concreto é da marca EMIC, modelo SSH300.

A NBR 5738:2003 recomenda a retificação das extremidades dos corpos de prova. A retificação consiste na remoção de fina camada de concreto do topo da amostra por meios mecânicos de forma a proporcionar uma superfície lisa que garanta a distribuição uniforme da carga de ensaio. Para Barbosa *et al.* (2009), a preparação do topo de um corpo de prova tem influência direta nos resultados, uma vez que a superfície deve ser plana e lisa para que o carregamento seja realizado de forma uniforme e não ocorra a excentricidade da carga. Porém, a retificação de corpos de prova de concreto permeável poderá desagregar suas partículas. Outra

opção de planificação das faces dos corpos de prova é através da aplicação de argamassa de capeamento, que consiste na aplicação de uma fina camada de argamassa composta por cimento e areia. Porém, segundo Barbosa *et al.* (2009), o capeamento também deve ser cauteloso para que a pasta de concreto não penetre nos poros, influenciando nos resultados.

Assim, as extremidades dos corpos de prova foram revestidas por discos de neoprene, utilizados em ensaios de compressão pela capacidade de armazenar as imperfeições presentes nas faces. A resistência à compressão foi obtida dividindo-se a força máxima alcançada pela área da seção transversal da amostra, conforme Equação 4.

$$F_c = \frac{4.F}{\pi.D^2} \quad (4)$$

Onde:

F_c : Resistência à compressão (Mpa);

F : Força máxima alcançada (N);

D : Diâmetro do corpo de prova (mm).

3.10 Resistência à tração

Os ensaios de resistência à tração do concreto permeável foram realizados através dos métodos de tração na flexão, em corpos de prova prismáticos, e de tração por compressão diametral, realizado em corpos de prova cilíndricos.

3.10.1 Resistência à tração na flexão

Para Mehta e Monteiro (2014), a compactação e a porosidade são fatores que interferem diretamente na resistência à tração na flexão, parâmetro de grande importância na análise de desempenho do concreto, que pode variar entre 1 e 3,8 MPa. A NBR 16416:2015 determina que corpos de prova de concreto permeável moldados em laboratório e submetidos a ensaios de tração na flexão devem possuir

as dimensões de 10 x 10 x 40 cm, sendo ensaiados segundo NBR 12142:2010, conforme Figura 15.

Figura 15 – Ensaio de tração na Flexão



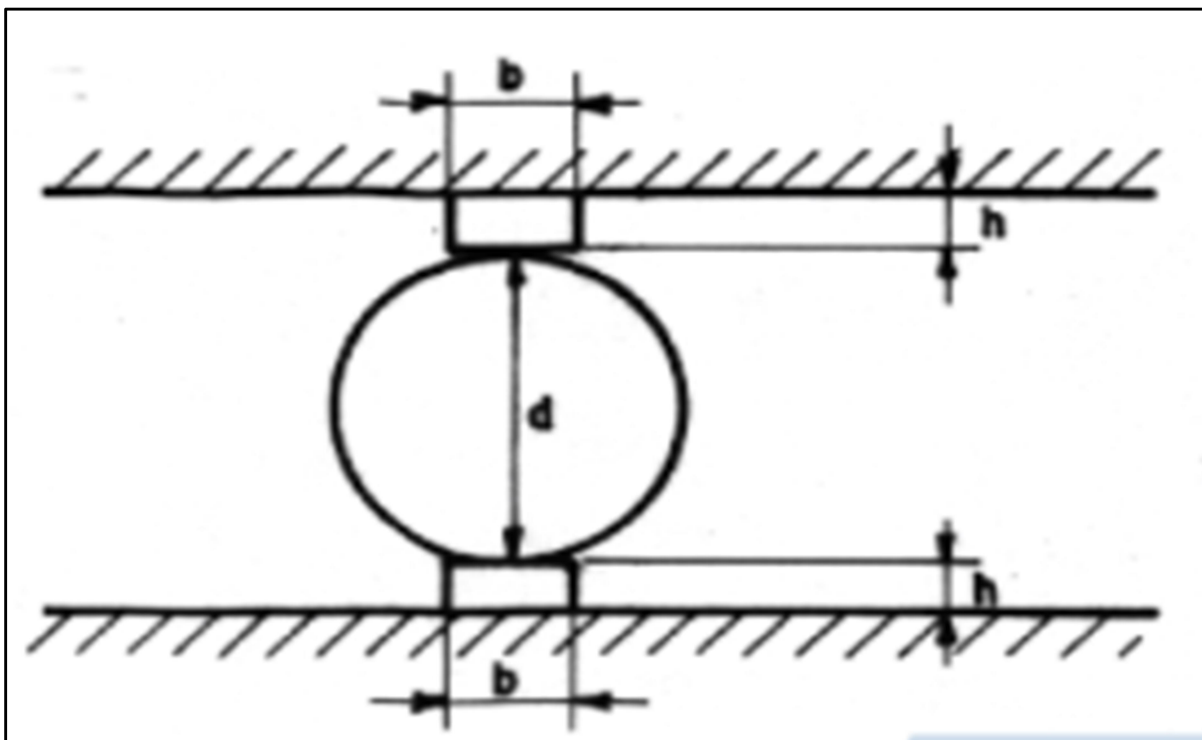
Fonte: O autor (2018).

O corpo de prova foi apoiado a 2,5 centímetros de suas extremidades e a carga foi aplicada por uma prensa padronizada pela NBR 5739:1994, de forma gradual e uniforme em dois pontos do eixo central, correspondentes a cada terço do comprimento total da amostra. Todas as rupturas foram verificadas no terço médio da amostra.

3.10.2 Resistência à tração por compressão diametral

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral foram disciplinados pela NBR 7222:1994. A Figura 16, extraída da referida norma, apresenta a disposição do corpo de prova no ensaio, onde o ensaio consiste na aplicação da carga ao longo de sua geratriz até o momento da ruptura.

Figura 16 – Disposição do corpo de prova no ensaio de tração pela compressão diametral



Fonte: NBR 7222:1994.

Em posse da carga máxima resistida aplicou-se a Equação 5, para determinar a resistência à tração pela compressão diametral das amostras.

$$f_{t,D} = \frac{2 \cdot F}{b \cdot d \cdot L} \quad (5)$$

Onde:

$f_{t,D}$: Resistência à tração por compressão diametral (MPa);

F: Carga máxima do ensaio (kN);

d: Diâmetro do corpo de prova (mm);

L: Altura do corpo de prova (mm).

Segundo pinheiro (2004), para concretos convencionais se verifica uma relação entre os métodos de ensaio de resistência à tração pela flexão e por compressão diametral, conforme Equação 6, que segue:

$$f_{ct} = 0,9 f_{ct,sp} \text{ ou } f_{ct} = 0,7 f_{ct,f} \quad (6)$$

Onde:

f_{ct} = Resistência à tração direta;

$f_{ct,sp}$ = Resistência à tração por compressão diametral;

$f_{ct,f}$ = Resistência à tração na flexão.

Como a NBR 16416:2015 exige para parâmetro de desempenho os resultados de resistência pelo método de tração na flexão, conforme relações apresentadas na Equação 6, os resultados da resistência à tração por compressão diametral devem ser majorados em aproximadamente 29% para traduzir de forma mais efetiva o seu desempenho neste quesito.

3.11 Permeabilidade

Os ensaios de permeabilidade foram realizados segundo método de carga constante, proposto pela NBR 16416:2014, e pelo método de carga variável, proposto por Neithalath (2003).

3.11.1 Permeabilidade segundo NBR16416:2015

O ensaio de permeabilidade pelo método de carga constante é exigido pela NBR 16416:2015 e foi realizado na placa 1. A norma citada disciplina a execução do ensaio de permeabilidade, o qual consistiu na colocação de um anel cilíndrico vazado, resistente a água e devidamente vedado sobre a superfície do concreto. O anel deve dimensões de 300 mm de diâmetro e 50 mm de altura, e o pavimento de concreto deverá possuir área mínima 0,5 m². Na superfície interna do cilindro foram marcadas as distâncias de 10 mm e 15 mm em relação à base. Foi utilizado recipiente de 20 litros, que permitiu o derramamento controlado de 18 kg de água, mantendo-a entre os níveis demarcados. O tempo de infiltração foi registrado. A Figura 17 demonstra procedimentos de realização do ensaio.

Figura 17 – Ensaio de permeabilidade segundo NBR 16416:2015



Fonte: O Autor (2018).

Conforme determina a norma, uma pré-molhagem foi realizada com derramamento controlado de 3,6 kg de massa de água no cilindro devidamente vedado. Caso a água demorasse mais do que 30 segundos para infiltrar, essa deveria ser a massa de água para a realização do ensaio. Contudo, para as 4 placas, o tempo de infiltração dos 3,6 kg de água variou entre 6 e 12 segundos, assim, a massa de água utilizada para o ensaio foi 18 kg.

Para cada placa, o ensaio foi repetido por três vezes e o tempo médio de infiltração foi adotado. O coeficiente de permeabilidade foi calculado através da Equação 7.

$$K = \frac{c.V}{D^2.t} \quad (7)$$

Onde:

K : Coeficiente de permeabilidade (m/s);

c : Fator de conversão de unidades;

V : volume de água(m³);

D : diâmetro interno do cilindro (m);

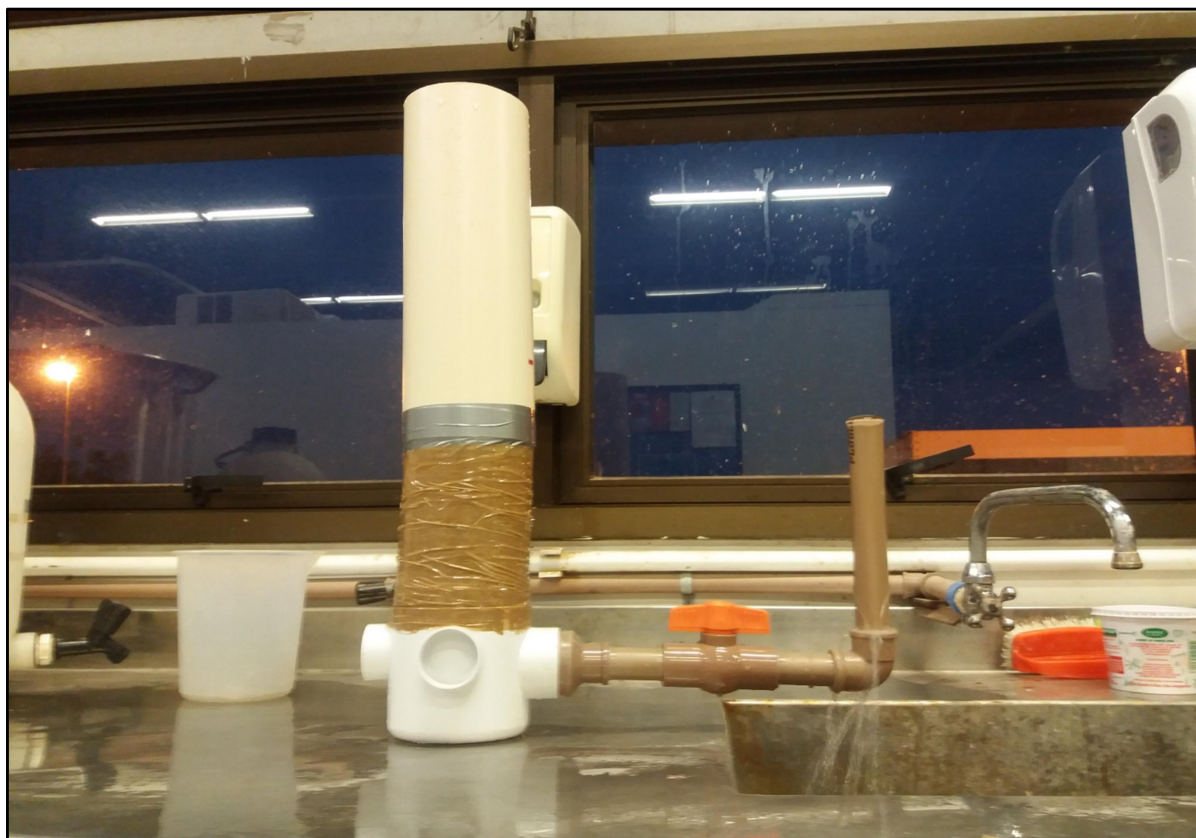
t : tempo de percolação da água (s).

3.11.2 Permeabilidade por carga variável

Outro método utilizado para verificação da condutividade hidráulica foi criado por Neithalath (2003). Este ensaio foi realizado para determinação dos coeficientes de permeabilidade de amostras cilíndricas moldadas e extraídas.

O método de ensaio de condutividade hidráulica utilizado no concreto convencional consiste na introdução de um fluido sobre pressão para que atravesse os minúsculos poros. O Método criado por Neithalath (2003) consiste na percolação de água pela força da gravidade através de uma amostra cilíndrica de concreto, inserida em um aparelho denominado como “permeâmetro”, representado na Figura 18.

Figura 18 – Permeâmetro de carga variável



Fonte: O autor (2018).

A Figura 18 apresenta o momento da execução do ensaio. A amostra cilíndrica de concreto permeável foi revestida com fita adesiva de modo a evitar a passagem da água pelas laterais. Na parte superior da amostra está localizado o reservatório, um tubo com 30 cm de altura onde a água fica armazenada até que ocorra o escoamento. Na parte inferior da amostra existe um suporte que recebe a água escoada e a encaminha para o tubo horizontal. A água passa pelo registro e sobe pelo tubo vertical até a altura um centímetro maior que o nível do corpo de prova para, enfim, sair do sistema.

A água foi adicionada no reservatório com o registro aberto até que a mesma atingisse a borda de saída do tubo de drenagem, eliminando assim o ar do sistema. O registro foi fechado e a água foi novamente adicionada, preenchendo o reservatório até o nível de 29 cm. O ensaio se iniciou com a abertura do registro, ocasionando a saída da água até que a mesma atingisse o nível de 7 cm. O tempo necessário para que ocorresse esta variação foi identificado. O ensaio foi repetido por três vezes para adoção do tempo médio.

O coeficiente de permeabilidade foi definido através da Lei de Darcy, representada pela Equação 8.

$$K = \frac{A_1 l}{A_2 t} \cdot \log\left(\frac{h_2}{h_1}\right) \quad (8)$$

Onde:

K : Coeficiente de permeabilidade (cm/s);

A_1 : Área da seção transversal da amostra (cm²);

A_2 : Área da seção transversal do tubo (cm²);

l : Altura da amostra (cm);

t : Tempo médio do ensaio (s);

h_2 : Altura inicial (cm);

h_1 : Altura final (cm).

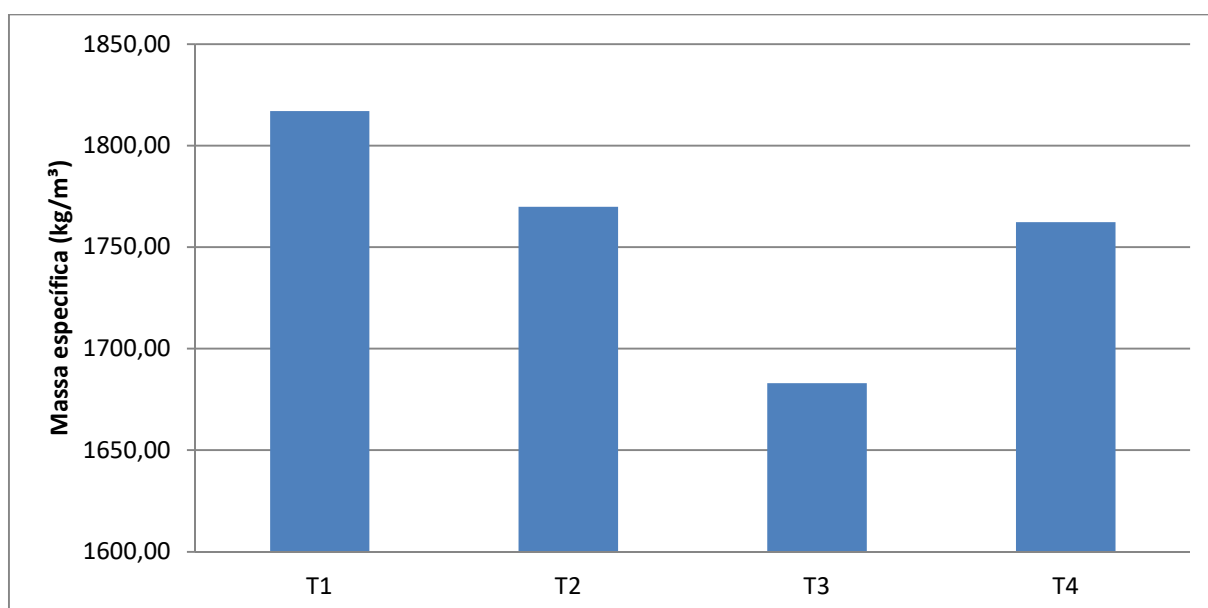
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos estudos realizados no presente trabalho estão graficamente representados. O detalhamento destes resultados, tais como variáveis e memoriais de cálculo podem ser verificados no Apêndice A.

4.1. Massa específica

Os ensaios de massa específica de todos os traços moldados neste estudo foram realizados no concreto em seu estado fresco, e os resultados estão apresentados no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Massa específica do concreto no estado fresco



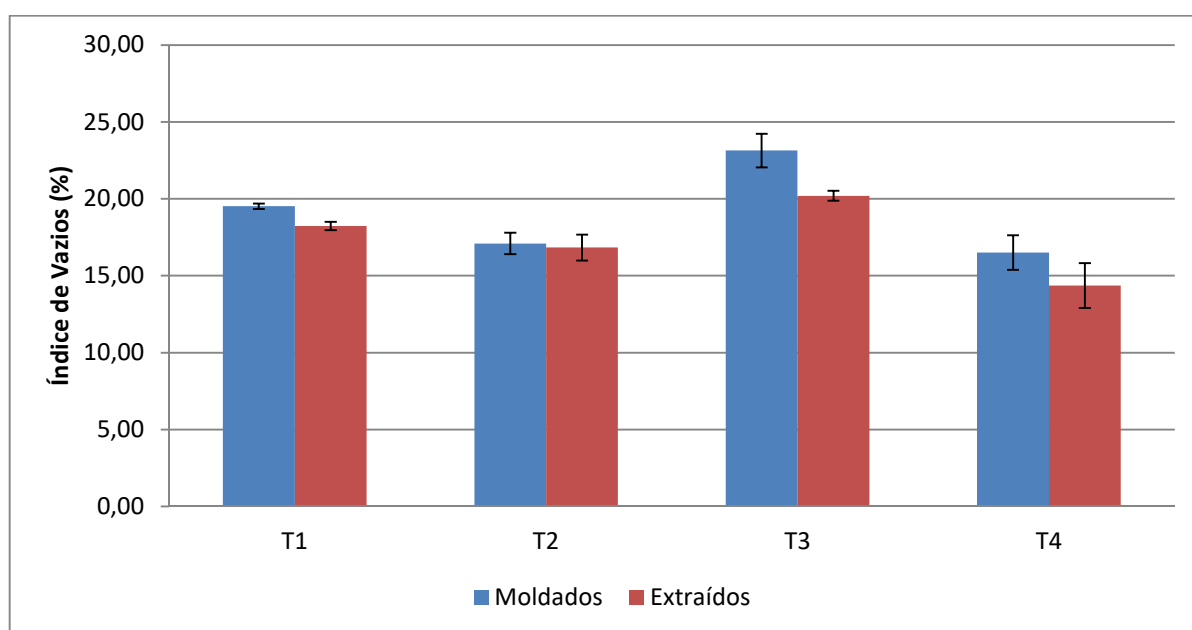
Fonte: O autor (2018).

O menor valor de massa específica foi obtido no traço T3, com 1.683 kg/m^3 , enquanto o traço T1 apresentou o maior resultado, com 1.816 kg/m^3 . Todos os traços atingiram o valor mínimo de 1.600 kg/m^3 exigido pela NBR 16416:2015, e estão dentro da margem indicada por Holtz (2011), entre 1.600 e 2.000 kg/m^3 .

4.2 Índice de vazios

Os resultados do ensaio de índice de vazios, realizados nos corpos de prova cilíndricos moldados e extraídos, estão apresentados no Gráfico 2.

Gráfico 2 – Índice de vazios dos corpos de prova moldados e extraídos



Fonte: O autor (2018).

O menor índice médio de vazios dos corpos de prova moldados foi encontrado no traço T4, com 16,51%, enquanto o maior índice de vazios foi encontrado no traço T3, com 23,14%. Em um comportamento semelhante aos corpos de provas moldados, os corpos de prova extraídos também apresentam o menor índice de vazios médio no traço T4, com 14,37%, e o maior índice de vazios no traço T3, com 20,19%.

Percebe-se uma redução geral do índice de vazios nos ensaios de corpos de prova extraídos em relação aos moldados, chegando a 12% nos traços T3 e T4. Em

média, os corpos de prova extraídos apresentaram redução aproximada do índice de vazios de 8,70%. A variação granulométrica da brita 0 entre os traços proporcionou elevada variação no índice de vazios, onde o traço T3 apresentou índice de vazios 40% superior ao traço T4, tanto nos corpos de prova moldados como extraídos.

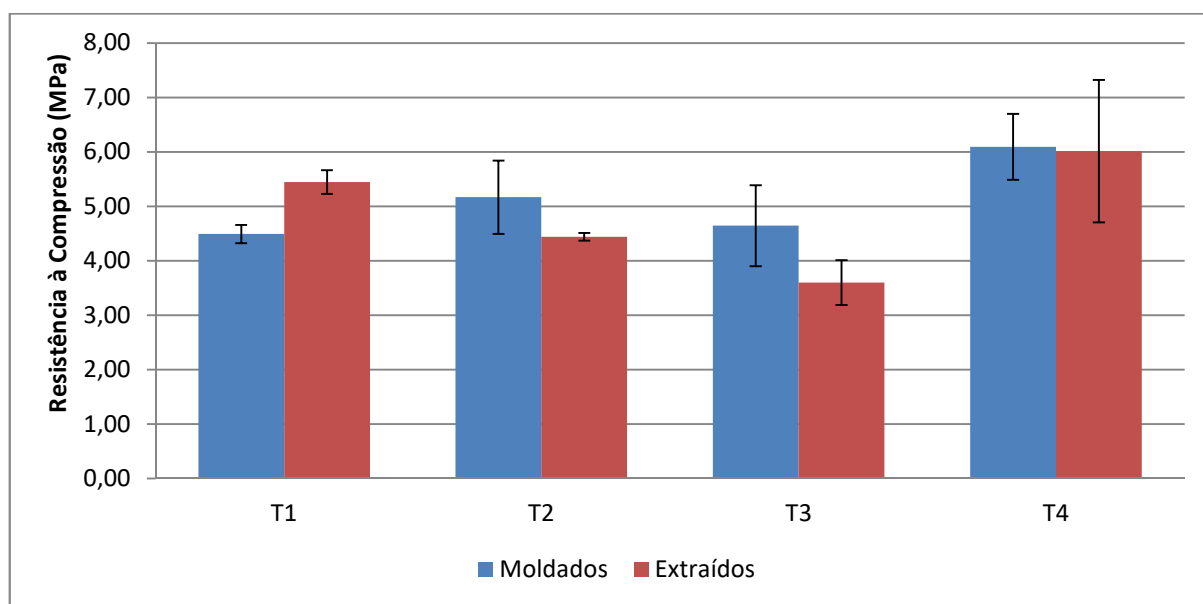
O traço T4 apresentou a maior variabilidade de resultados, que pode ser ocasionada por ruídos experimentais durante o processo de moldagem e extração de corpos de prova, apresentando potencial de variação de 1,13% para os corpos de prova moldados e 1,46% para os corpos de prova extraídos. Vale aqui lembrar que o traço T1 foi composto pela mistura de agregado passante na peneira de 9,5 mm e retido na peneira 6,3 mm com agregado passante na peneira 6,3 mm e retido na peneira de 4,75 mm. O traço T2 foi composto por agregado passante na peneira de 9,5 mm e retido na peneira 6,3 mm, e agregado passante na peneira 4,75 mm e retido na peneira 2,36 mm. O traço T3 foi composto por agregado passante na peneira 6,3 mm e retido na peneira 4,75 mm, e passante na peneira 4,75 mm e retido na peneira 2,36 mm, e o traço T4 foi composto por brita 0 sem distinção granulométrica.

Os resultados apresentados neste estudo se encontram dentro da faixa de variação indicada por Canholi (2005) como ideal para um concreto permeável, entre 15 e 30%, porém mais próximos à margem inferior indicada. Para Virgiliis (2009), concretos com índices de vazios inferiores a 15% são considerados de baixa porosidade e podem proporcionar baixa permeabilidade, contrapondo aos concretos com índices de vazios superiores a 30%, que proporcionam permeabilidade elevada.

4.3 Resistência à compressão

O Gráfico 3 apresenta os resultados de resistência à compressão dos corpos de prova moldados e extraídos.

Gráfico 3 – Resistência à compressão dos corpos de prova moldados e extraídos



Fonte: O autor (2018).

As maiores resistências à compressão dos corpos de prova moldados foram obtidas no traço T4, com resistência média de 6,09 MPa, e no traço T2 com 5,17 MPa, traços estes com maior variação granulométrica do agregado. As menores resistências foram obtidas no traço T3, com 4,64 MPa e no traço T1 com 4,49 MPa, traços estes com graduação mais uniforme. Os corpos de prova extraídos também apresentaram maior resistência à compressão no traço T4 com 6,02 MPa, e a menor resistência no traço T3, com 3,60 MPa. O traço T4 também apresenta o maior desvio padrão dos resultados, apresentando potencial de variabilidade de 1,31 MPa.

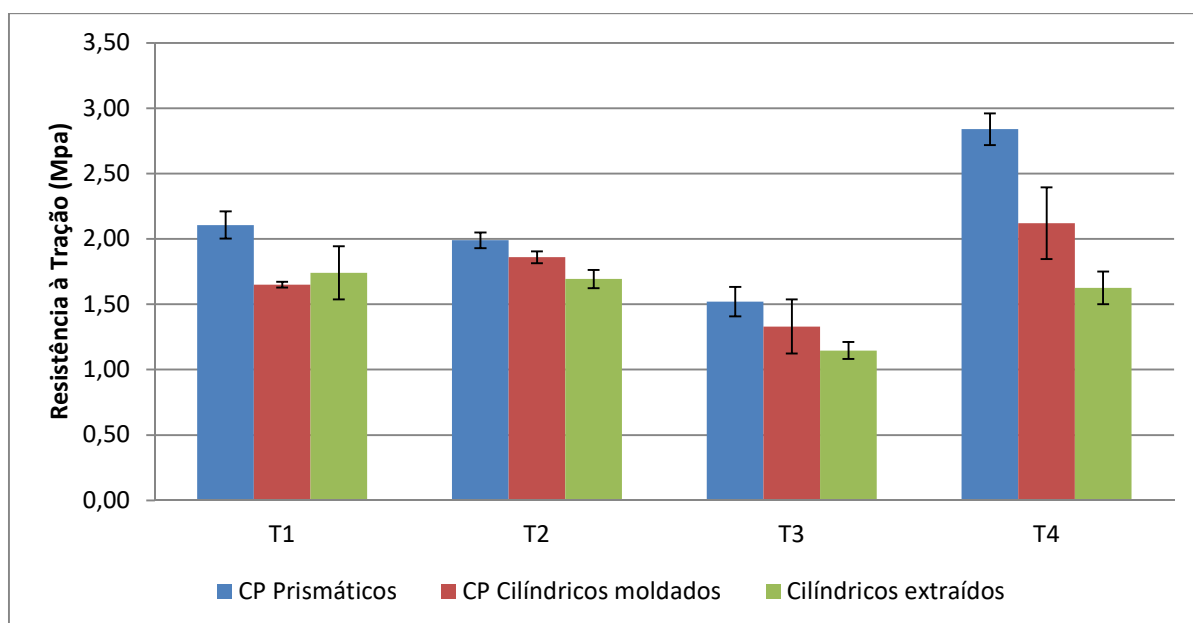
Verifica-se que a resistência à compressão do concreto moldado, em geral, é superior aos corpos de prova extraídos, conforme previa Holtz (2011). Isso ocorre devido à própria extração resultar em microfissuras internas no corpo de prova, além das condições de cura proporcionarem maior ganho de resistência no concreto moldado. Porém, isso não se verifica no traço T1, composto por agregados com maiores diâmetros, onde corpos de prova extraídos apresentaram maiores resistências. Este tipo de comportamento também já era previsto por Holtz (2011), onde, segundo o autor, quanto maior a dimensão do agregado, maior a dificuldade de acomodação no corpo de prova.

A resistência à compressão do concreto foi inferior ao mínimo de 20 MPa exigido pela NBR 16416:2015 para aplicação do material no formato de peças de concreto permeável em áreas de tráfego de veículos leves.

4.4 Resistência à tração

As resistências à tração na flexão dos corpos de prova prismáticos e as resistências à tração por compressão diametral dos corpos de prova cilíndricos moldados e extraídos estão apresentados no Gráfico 4.

Gráfico 4 – Resistência à tração de corpos de prova cilíndricos e prismáticos



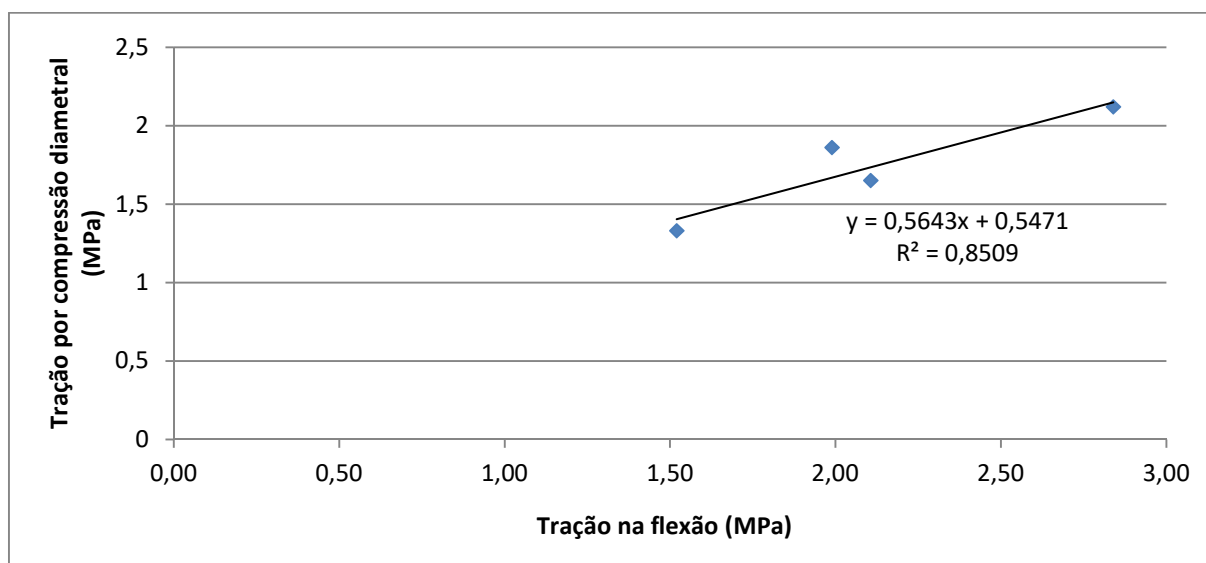
Fonte: O autor (2018).

O traço T4 apresentou a maior resistência à tração na flexão dos corpos de prova prismáticos, com 2,84 MPa, seguido do traço T1, com 2,11 MPa. O traço T3 apresentou a menor resistência dentre as amostras ensaiadas por este método, com 1,52 MPa.

A maior resistência à tração pela compressão diametral dos corpos de prova cilíndricos moldados foi de 2,12 MPa, no traço T4, e a menor resistência foi obtida no traço T3, com 1,33 MPa. Em relação aos corpos de prova extraídos, observam-se resistências semelhantes entre os traços T1, T2 e T4, de em torno de 1,70 MPa, exceto o traço T3, que apresentou resistência de 1,15 MPa. O traço T1 apresentou a

maior resistência, com 1,74 MPa, superior inclusive a resistência à tração dos corpos de prova moldados pelo método de compressão diametral, porém com maior desvio padrão dos resultados. No geral, os corpos de prova cilíndricos extraídos apresentaram resistências inferiores, influenciadas também pela granulometria dos agregados e pelo processo de cura das amostras, conforme previa Holtz (2011). O Gráfico 5 apresenta a correlação entre os ensaios de resistência pela compressão diametral e pela tração na flexão.

Gráfico 5 – Correlação entre métodos de ensaio de resistência à tração



Fonte: O autor (2018).

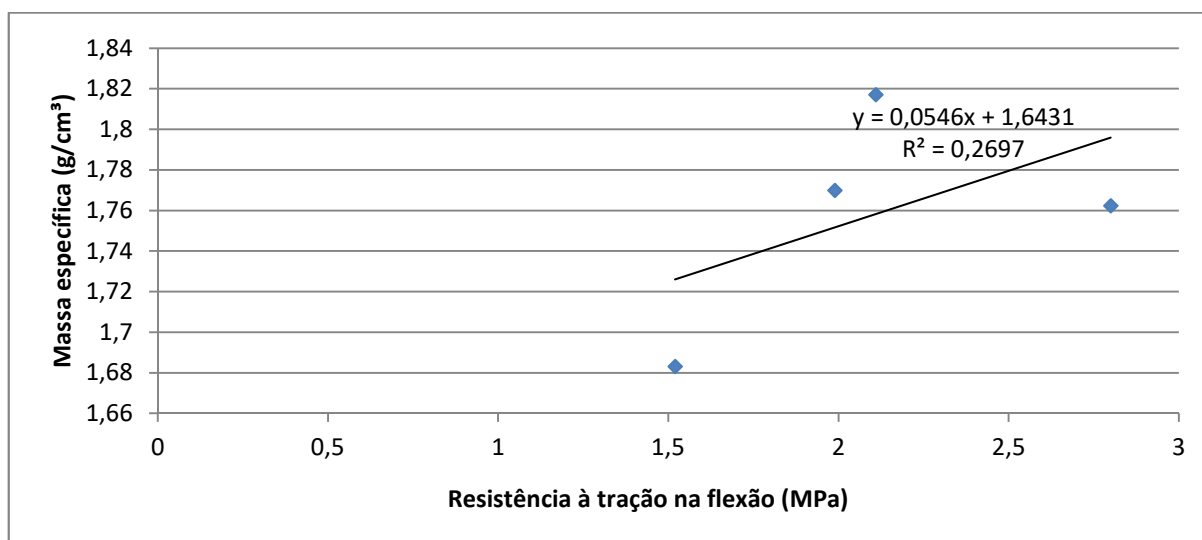
Verifica-se correlação superior a 85% entre os resultados analisados, onde os ensaios de tração na flexão apresentaram resistência média 21% superiores aos corpos de prova moldados, porém estes resultados são inferiores aos previstos através das relações desenvolvidas por Pinheiro (2004), que prevê acréscimo de resistência na ordem de 29%. Assim, as relações definidas pelo autor podem não caracterizar efetivamente o desempenho do concreto permeável, uma vez que este possui comportamento distinto do concreto convencional. Em relação aos corpos de prova extraídos, a variação dos resultados de resistência foi superior a 35%.

A resistência à tração do concreto permeável, independente do traço e do método de ensaio, está dentro da margem prevista por Mehta e Monteiro (2014), entre 1 e 3,5 MPa, e superior ao mínimo de 1 MPa exigido pela NBR 16416:2015 para aplicação do material em áreas de tráfego de pedestres. A caracterização mecânica dos corpos de prova moldados no traço T1, pelo método de tração na

flexão, e traço T4, pelos métodos de tração na flexão e compressão diametral, apresentaram resultados suficientes para aplicação do material em locais de tráfego de veículos leves, desde que moldados no local.

O Gráfico 6 apresenta os resultados de massa específica e tração na flexão. Segundo a NBR 16416:2015, resultados válidos são obtidos desde que possuam correlação superior a 0,90, ou seja, os resultados de massa específica devem traduzir em 90% os resultados de tração na flexão, e vice-versa.

Gráfico 6 – Correlação entre massa específica x tração na flexão

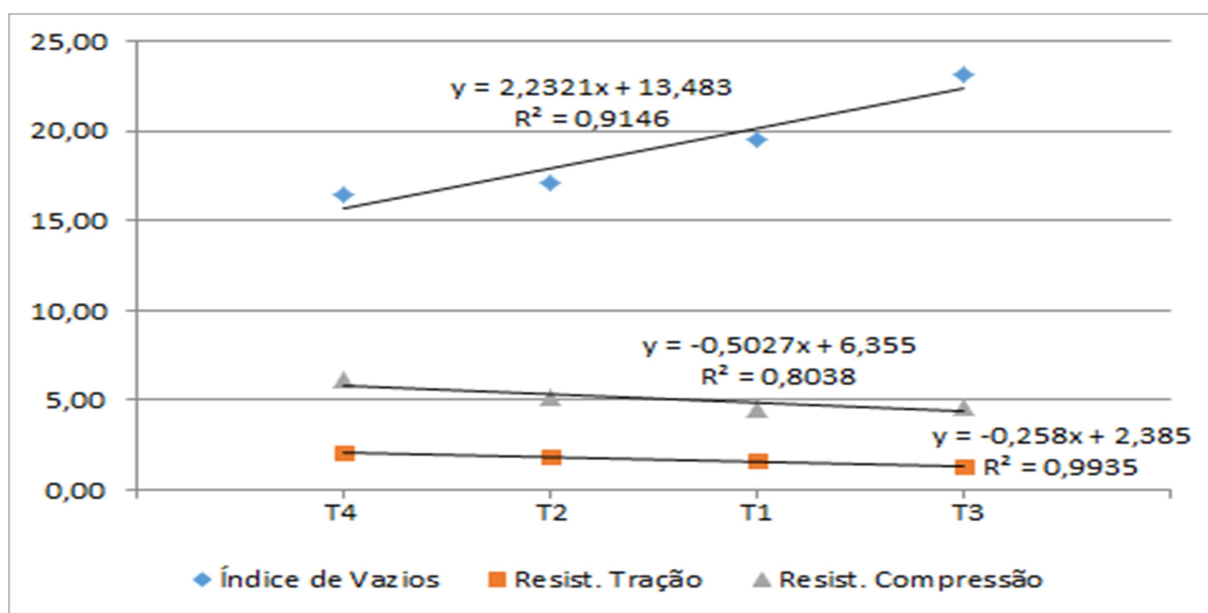


Fonte: O autor (2018).

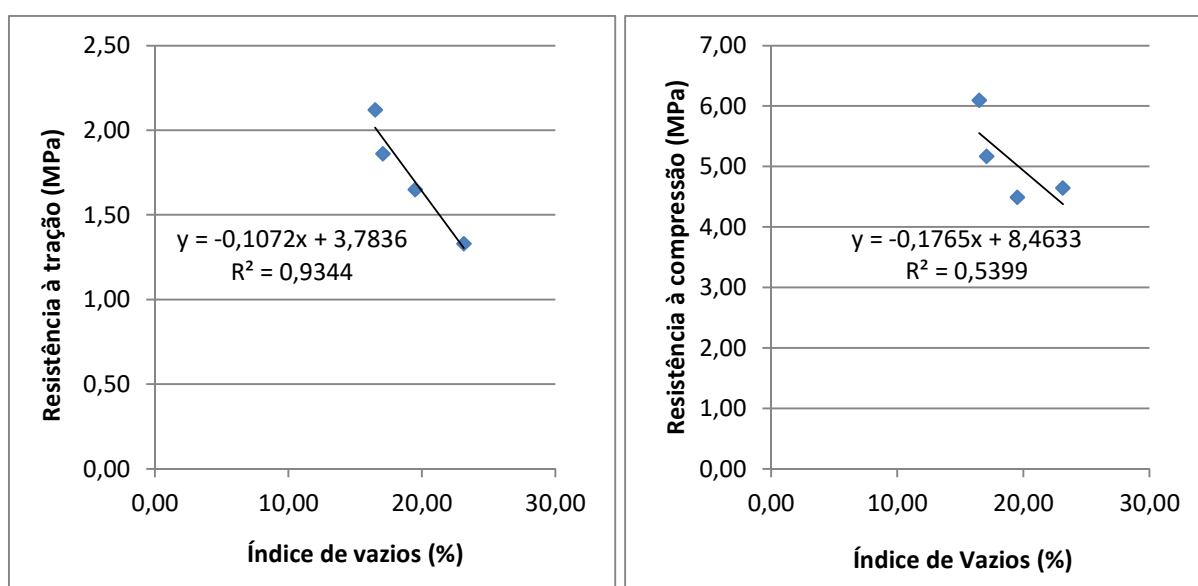
Verifica-se o comportamento linear dos resultados de massa específica entre os traços T1 e T3, com correlação superior a 97%. Porém, o traço T4 apresenta a maior resistência à tração na flexão e não apresenta o maior resultado de massa específica, fazendo com que a correlação entre os resultados seja reduzida a 27%. Conforme Tennis *et al.* (2004), traços de concreto permeável com maior empacotamento tendem a apresentar maior massa específica e, conseqüentemente, maior resistência. Assim, os resultados de massa específica para o traço T4 podem não caracterizar efetivamente o material estudado, sendo necessária a repetição do ensaio.

O comportamento mecânico do concreto em função do índice de vazios das amostras cilíndricas moldadas está apresentado no Gráfico 7. Estão apresentadas também as correlações do comportamento mecânico do concreto em função do índice de vazios das amostras.

Gráfico 7 – Comportamento mecânico e índice de vazios do concreto nos corpos de prova cilíndricos moldados



a)



b)

c)

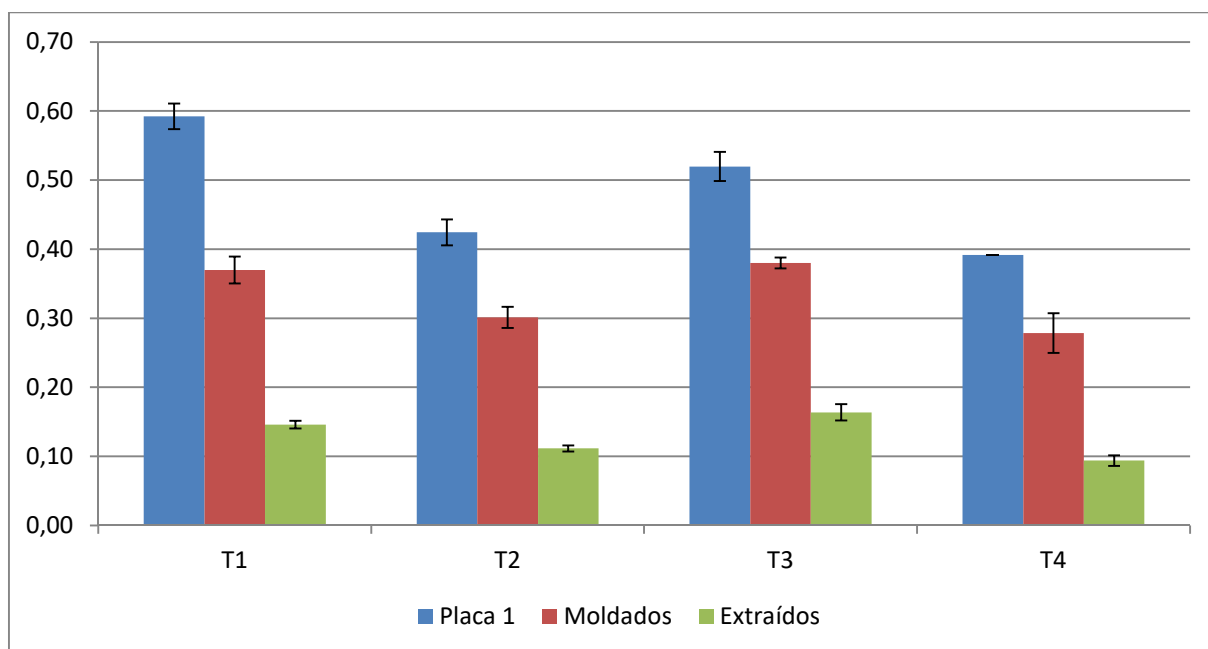
Fonte: O autor (2018).

As resistências do concreto permeável, tanto à tração como à compressão das amostras cilíndricas moldadas, são inversamente proporcionais ao índice de vazios presentes na mistura (a), conforme já havia verificado Tennis *et al.* (2004). À medida que ocorre o aumento dos vazios, tanto a resistência à tração quanto a resistência à compressão são reduzidas. Nota-se elevada correlação entre o índice de vazios e a resistência à tração (b), superior a 93%, e de 54% para com os resultados de resistência à compressão (c).

4.5 Permeabilidade

Os resultados de permeabilidade do concreto ensaiado pelos métodos de carga variável e de carga contínua estão apresentados no Gráfico 8.

Gráfico 8 – Permeabilidade do concreto entre corpos de prova moldados, extraídos e a placa 1



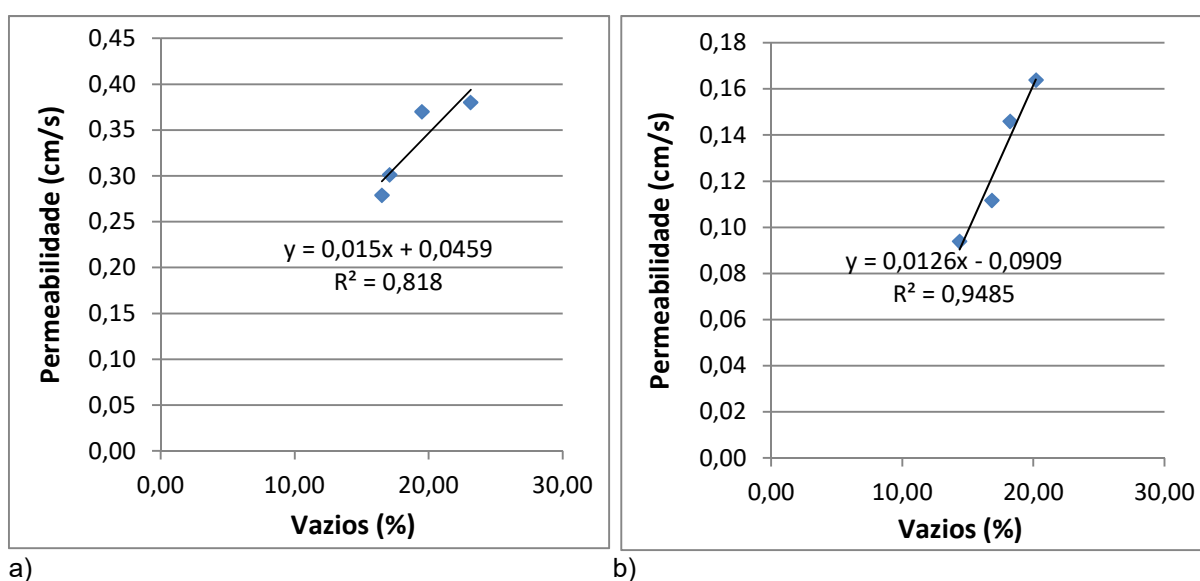
Fonte: O autor (2018).

A maior permeabilidade dos corpos de prova cilíndricos moldados foi observada no traço T3, com 0,38 cm/s, enquanto a menor permeabilidade foi identificada no traço T4, com 0,28 cm/s. Em relação aos corpos de prova extraídos, a maior permeabilidade também foi identificada no traço T3, com 0,16 cm/s, e a menor permeabilidade no traço T4, com 0,09 cm/s. Percebe-se redução geral da permeabilidade nos corpos de prova extraídos em relação aos moldados de em torno de 60%, conforme havia alertado Holtz (2011).

Em relação aos ensaios realizados na placa 1, a maior permeabilidade é verificada no traço T1, com taxa de infiltração de 0,58 cm/s, enquanto a menor permeabilidade pode ser observada no traço T4, com permeabilidade de 0,39 cm/s. Conforme previa Tennis *et al.* (2004), os traços compostos por agregado de semelhante granulometria proporcionaram maior permeabilidade.

A permeabilidade pelo método proposto pela NBR 16416:2015 apresentou resultados superiores aos obtidos pelo método de Neithalath (2003). Esta constatação está relacionada com as cargas dos ensaios e ao fato de a água estar condicionada lateralmente nos corpos de prova cilíndricos, onde a percolação ocorre por toda a sua extensão, enquanto nas placas a área de infiltração da água está condicionada apenas na superfície. O Gráfico 9 apresenta a relação entre a permeabilidade e o índice de vazios dos corpos de prova cilíndricos moldados (a) e extraídos (b).

Gráfico 9 – Correlação entre permeabilidade e índice de vazios



Fonte: O autor (2018).

O traço T4 dos corpos de prova extraídos obteve índice de vazios inferior a 15%, e foi o único que não atingiu a permeabilidade mínima de 0,1 cm/s exigida pela NBR 16416:2015. Conforme previsão de Virgiliis (2009), traços com índice de vazios inferiores a 15% proporcionam baixa permeabilidade. Os demais traços, independentemente do método de ensaio, apresentaram permeabilidade acima do mínimo exigido e índice de vazios superior a 15%. Os resultados apresentados no Gráfico 8 corroboram com esta afirmação, uma vez que os resultados de permeabilidade estão diretamente atrelados ao índice de vazios presente no concreto.

5 CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos, pode-se concluir que a variação da granulometria do agregado de brita 0 altera as propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto permeável. A graduação uniforme do agregado proporciona ao concreto maior permeabilidade, porém menor resistência. Agregados bem graduados proporcionam maior resistência, porém menor permeabilidade, e agregados de graduação aberta proporcionam resistência e permeabilidade intermediárias.

Os corpos de prova extraídos tendem a apresentar resistência mecânica inferior aos corpos de prova moldados devido às diferentes condições de cura às quais o concreto é submetido, sendo necessário maior cuidado na aplicação da técnica em campo, pois o concreto poderá não alcançar a resistência desejada. Porém, para traços com granulometria uniforme e mais espessa, superior a 6,3 mm no caso deste estudo, os resultados de resistência à compressão e à tração por compressão diametral dos testemunhos se apresentaram superiores. Isso se deve aos agregados estarem mais bem acomodados nas laterais das amostras extraídas. Para traços mais fechados, bem graduados ou até mesmo de graduação aberta, a variação do empacotamento entre amostras é menor, não se mostrando tão influente na resistência final do concreto.

A resistência à compressão do concreto foi inferior aos 20 MPa exigidos pela NBR 16416:2015 para aplicação do material como peças de concreto permeável em áreas de tráfego de veículos leves. Porém, de acordo com os resultados de resistência à tração, os traços T1 e T4 podem ser moldados em áreas de tráfego de veículos leves, e os demais traços podem ser aplicados em locais de tráfego de pedestres.

Em relação à permeabilidade, todos os traços atingiram o mínimo exigido, inclusive para o T3 onde o agregado já passa a ser considerado miúdo. Porém a melhor acomodação dos agregados dos corpos de prova extraídos reduziu em aproximadamente 60% a permeabilidade do concreto. Além disso, constatou-se que índice de vazios inferiores a 15% podem não proporcionar a permeabilidade mínima exigida pela NBR 16416:2015.

A substituição dos ensaios propostos pela NBR 16416:2015 por outros métodos analisados no presente estudo não são recomendados, uma vez que os ensaios propostos apresentaram resultados superiores aos métodos alternativos analisados, evitando assim que um material que possua o desempenho exigido pela norma seja comprometido.

Dentre os traços analisados, o concreto que melhor aliou permeabilidade e resistência foi obtido no traço T4, composto por agregado de brita 0 sem distinção granulométrica, apresentando resistência à compressão de 6,09 MPa, resistência à tração na flexão de 2,84 MPa e permeabilidade de 0,39 cm/s. Parâmetros estes suficientes para aplicação do concreto em locais de tráfego de veículos leves, desde que moldado no local.

Alternativas sustentáveis capazes de mitigar efeitos de problemas que afetem a qualidade de vida das pessoas devem ser implantadas. Pavimentos de concreto permeável enquadram-se neste contexto, pois podem ser aplicados em substituição, em algumas situações, aos pavimentos tradicionais. A região do Vale do Taquari/RS é constantemente afetada por alagamentos e inundações, e a aplicação da técnica poderá ajudar a reduzir estes efeitos. Todavia, como é uma alternativa nova no país, ainda carece de maiores investimentos.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para dar prosseguimento aos estudos realizados e em função dos resultados obtidos, algumas sugestões estão listadas para aplicação da técnica em trabalhos futuros, conforme segue:

- Aplicar um traço mais rico, ou adicionar diferentes teores de agregado miúdo no traço estudado, a fim de aumentar o empacotamento das partículas e, consequentemente, a resistência do concreto;
- Reduzir a relação entre água e cimento com a incorporação de aditivo plastificante ou superplastificante, com análise prévia do comportamento dos componentes do concreto permeável em contato com a adição química;
- Variar as formas de compactação do concreto permeável. A compactação através de rolos pode ser uma alternativa que resulte em maior resistência, aliada a uma superfície mais lisa, que proporcione maior conforto aos usuários;
- Avaliar o comportamento do concreto permeável em relação à fadiga, desgaste e abrasão;
- Produzir concreto permeável com utilização de resíduo proveniente da própria demolição de revestimentos de concreto permeáveis;
- Aplicar o concreto permeável em campo para avaliar seu desempenho quanto à permeabilidade e durabilidade.

REFERÊNCIAS

ACIOLI, LAURA A. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte**. 184p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

ALESSI, F.; KOKOT, P. J.; GOMES, J. **Comparação do escoamento superficial gerado por pavimentos permeáveis em blocos de concreto e asfalto poroso**. Da Vinci. Curitiba, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland – BT-106**, 7 ed., São Paulo, 2002.

AMERICAN CONCRETE PAVEMENT ASSOCIATION. **ASTM E 965 – 96**: Standard test method for measuring pavement macrotexture depth using a volumetric technique. ASTM, 2001.

AMERICAN CONCRETE PAVEMENT ASSOCIATION. **Stormwater management with pervious concrete pavement**. Concrete Information, Skokis, 2006.

ARAÚJO, Paulo R.; TUCCI, CARLOS E. M.; GOLDENFUM, JOEL A. **Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial**. Porto Alegre: ABRH, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. NBR 5738 Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de Compressão para Corpos de Prova Cilíndricos. NBR 5739 Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Argamassa e concreto – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7680**: Concreto – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9479**: Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova de argamassa e concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9781**: Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16416**: Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

BAPTISTA, Márcio; NASCIMENTO, Nilo; BARRAUD, Sylvie. **Técnicas compensatórias de drenagem urbana**. Porto Alegre: ABRH, 2005.

BARBOSA, F. R., MOTA, J., SILVA, A., OLIVEIRA, R. **Análise da Influência do Capeamento de Corpos-de-Prova Cilíndricos na Resistência à Compressão do Concreto**. Anal do 51º Congresso Brasileiro do Concreto. 2009.

BATEZINI, Rafael. **Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves**. Dissertação de Mestrado – Engenharia dos Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 435 p., 1987.

BERNUCCI, L. B.; CERATTI, J. A. P.; MOTTA, L. M. G.; SOARES, J. B.
Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. Petrobras. Rio de Janeiro: ABEDA, 2008.

CANHOLI, Aluísio P. **Drenagem urbana e controle de enchentes.** São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

CASTRO, Luiz F. A. **Estudo de traço de concreto permeável de cimento Portland.** 57 p. Diplomação – Graduação em Engenharia Civil. Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2015.

CIVILIZAÇÃO ENGENHARIA. **O uso de concreto permeável na pavimentação.** Disponível em: <<https://civilizacaoengenharia.wordpress.com/2012/05/16/o-uso-de-concreto-permeavel-na-pavimentacao>>. Acesso em: 18 out. 2017.

COMPANHIA RIOGRANDENSE DE SANEAMENTO – CORSAN. **Tratamento de água.** Disponível em: <<http://www.corsan.com.br/tratamentodeagua>>. Acesso em: 11 set. 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES.
Manual de restauração de pavimentos asfálticos. IPR-720, 2006.

DONG, QIAO; WU, HAO; HUANG, BAOSHAN; SHU, XIANG; WANG, KEJIN.
Development of a simple and fast test method for measuring the durability of Portland cement pervious concrete (final report). 27 p. Dept of Civil and Environmental Engineering. University of Tennessee, Knoxville, 2010.

HÖLTZ, Fabiano C. **Uso de concreto permeável na drenagem urbana:** análise de viabilidade técnica e de impacto ambiental. 118 f. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2011.

INTERCEMENT BRASIL. **Ficha de informações de segurança de produtos químicos - FISPQ.** Disponível em: <http://brasil.intercement.com/app/files/Arquivos/FICHA-01-FISPQ-Ficha-de-Informacoes-de-Seguranca_InterCement_2016.pdf>. Acesso em: 13 set. 2017.

JAHN, LUCAS C. **Influência do tamanho e teor de agregado nas propriedades do concreto permeável.** 63 f. Diplomação – Graduação em Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2016.

LIAN, C. ZHUGE, Y. **Optimum mix design of enhanced permeable concrete – An experimental investigation.** Elsevier Journal Construction and Building Materials, 2010.

MALLMANN, Marcelo B. **Estudo experimental do escoamento superficial de dois pavimentos permeáveis de concreto em função de chuvas extremas no Vale do Taquari.** 114 f. Monografia (graduação) – Engenharia Civil, Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2017.

MARCHIONI, Mariana L.; SILVA, Claudio O. **Pavimento intertravado permeável: melhores práticas**. 24 p. São Paulo: Associação brasileira de cimento Portland (ABCP), 2010.

MARIANO, Humberto R. **Influência do teor de argamassa e da granulometria da brita na permeabilidade e nas resistências à compressão e à abrasão de concretos permeáveis**. 163 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G. **Mecânica dos pavimentos**. 3. Ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MIGUEZ, Marcelo G.; VERÓL, Aline P.; REZENDE, Osvaldo M. **Drenagem Urbana: do projeto tradicional à sustentabilidade**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

MONTEIRO, Anna Carolina Neves. **Concreto poroso: dosagem e desempenho**. 36 p. Monografia (graduação) – Universidade Federal de Goiânia, Goiânia, 2010.

NEITHALATH, N.; BENTZ, D.P.; SUMANASOORIYA, M. S. **Development of quiet and durable porous Portland cement concrete paving materials**. Final Report, The institute for Safe, Quiet, and Durable Higways, 2003.

NEVILLE, A.M.; BROOKS, J.J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Techbooks. Porto Alegre, 2010.

PINHEIRO, Libânio M. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios**. São Paulo, Universidade de São Paulo, 2004.

SANTOS, ÁLVARO R. **Enchentes e deslizamentos: causas e soluções: áreas de risco no Brasil**. São Paulo, Pini, 2012.

SCHAEFER, V.; WANG, K.; SULEIMAN, M.; KEVERN, J. **Mix design development for pervious concrete in cold weather climates**. Final Report, Civil Engineering, IowaStateUniversity, 2006.

SIKA BRASIL. **Aditivo superplastificante de última geração para concreto de alto desempenho**. Disponível em: <<http://bra.sika.com/pt/solucoes-produtos/construcao/tecnologia-do-concreto/concreteiras/aditivos/grupos-de-produtos-para-aditivos/superplastificante-tipo-2.html>>. Acesso em: 10 set. 2017.

SULEIMAN, M.T.; KEVERN, J.; SCHAEFER, V. R.; WANG, K. **Effect of compaction energy on pervious concrete properties**. Proceedings of Concrete Technology Forum: Focus on Pervious Concrete, Nashville, TN, 2006.

SUZUKI, CARLOS Y.; AZEVEDO, ANGELA M.; JÚNIOR, FELIPE I. K. **Drenagem subsuperficial de pavimentos**: conceitos e dimensionamento. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

TECNOSIL. **Sílica Ativa**. Disponível em: <<http://www.tecnosilbr.com.br/wp-content/themes/tecnosilbr/download/catalogo-silica-ativa.pdf>>. Acesso em: 09 set. 2017.

TENNIS, Paul D.; LEMING, Michael L.; AKERS, David J. **Pervious concrete pavements**. Maryland, EUA, 2004.

VIRGILIIS, Afonso L. C. **Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias**. 213 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Transportes. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

APÊNDICE

APÊNDICE A – Detalhamento dos resultados

Massa específica no estado fresco

Traço	Massa do concreto (kg)	Volume do recipiente (m³)	Massa específica (kg/m³)
T1	9,630	0,0053	1816,98
T2	9,380	0,0053	1769,81
T3	8,920	0,0053	1683,02
T4	9,340	0,0053	1792,26

Índice de vazios

Índice de vazios de corpos de prova cilíndricos moldados.

	Amostras	Peso seco (kg)	Peso submerso (kg)	Altura da amostra (m)	Volume da amostra	Vazios (%)	Índice médio de vazios (%)
T1	Amostra 1	2,615	1,476	0,180	0,00141	19,39	19,51
	Amostra 2	2,527	1,423	0,175	0,00137	19,64	
T2	Amostra 1	2,676	1,491	0,181	0,00142	16,60	17,09
	Amostra 2	2,623	1,465	0,179	0,00141	17,59	
T3	Amostra 1	2,529	1,430	0,184	0,00144	23,91	23,14
	Amostra 2	2,689	1,525	0,191	0,00150	22,37	
T4	Amostra 1	2,562	1,426	0,175	0,00137	17,31	16,51
	Amostra 2	2,608	1,450	0,175	0,00137	15,71	

Índice de vazios de corpos de prova cilíndricos extraídos.

	Amostras	Peso seco (kg)	Peso submerso (kg)	Altura da amostra (m)	Volume da amostra	Vazios (%)	Índice médio de vazios (%)
T1	Amostra 1	2,632	1,506	0,175	0,00137	18,03	18,23
	Amostra 2	2,555	1,460	0,171	0,00134	18,43	
T2	Amostra 1	2,583	1,452	0,172	0,00135	16,23	16,83
	Amostra 2	2,515	1,426	0,168	0,00132	17,42	
T3	Amostra 1	2,461	1,399	0,170	0,00133	20,42	20,19
	Amostra 2	2,471	1,403	0,170	0,00133	19,97	
T4	Amostra 1	2,754	1,543	0,178	0,00140	13,33	14,37
	Amostra 2	2,597	1,468	0,170	0,00133	15,40	

Resistência à compressão

Resistência à compressão de corpos de prova moldados.

Traço	Carga (N)	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)
T1	3456,23	4,32	4,49
	3594,48	4,49	
	3732,73	4,66	
T2	4138,83	5,17	5,17
	3594,48	4,49	
	4674,55	5,84	
T3	3197,01	3,99	4,64
	4363,49	5,45	
	3594,48	4,49	
T4	4570,86	5,71	6,09
	4631,35	5,78	
	5434,92	6,79	

Resistência à compressão de corpos de prova extraídos.

Traço	Carga (N)	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)
T1	4484,46	5,60	5,45
	4233,88	5,29	
T2	3594,48	4,49	4,44
	3516,71	4,39	
T3	3119,25	3,89	3,60
	2652,66	3,31	
T4	5555,89	6,94	6,02
	4078,35	5,09	

Resistência à Tração

Resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos.

Traço	Carga (N)	Resistência (MPa)	Média (MPa)
T1	6100,90	2,14	2,11
	6270,37	2,19	
	5677,23	1,99	
T2	5846,70	2,05	1,99
	5507,76	1,93	
	5677,23	1,99	
T3	3982,53	1,39	1,52
	4575,68	1,60	
	4490,94	1,57	
T4	8049,80	2,82	2,84
	7795,60	2,73	
	8473,48	2,97	

Resistência à tração por compressão diametral de cp's cilíndricos moldados.

Traço	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	Carga(N)	Resistência (Mpa)	Média (Mpa)
T1	177	100	46399,90	1,67	1,65
	166	100	42684,40	1,64	
T2	181	100	51929,80	1,83	1,86
	181	100	53744,40	1,89	
T3	193	100	35944,80	1,19	1,33
	190	100	44153,30	1,48	
T4	175	100	63681,00	2,32	2,12
	176	100	53312,30	1,93	

Resistência à tração por compressão diametral de cp's cilíndricos extraídos.

Traço	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	Carga(N)	Resistência (Mpa)	Média (Mpa)
T1	184	100	46140,70	1,60	1,74
	185	100	54781,20	1,89	
T2	182	100	47004,70	1,64	1,69
	184	100	50374,50	1,74	
T3	184	100	31797,30	1,10	1,15
	183	100	34303,10	1,19	
T4	184	100	44412,50	1,54	1,62
	183	100	49251,30	1,71	

Permeabilidade

Permeabilidade de corpos de prova cilíndricos moldados.

Traço	Altura (cm)	Área (cm²)	Tempo Médio (s)	Permeabilidade (cm/s)	Permeabilidade média (cm/s)
T1	17,50	78,54	30,33	0,36	0,37
	17,20	78,54	27,67	0,38	
T2	18,60	78,54	71,33	0,16	0,30
	18,20	78,54	38,67	0,29	
	18,20	78,54	36,00	0,31	
T3	17,60	78,54	29,00	0,37	0,38
	17,50	78,54	28,00	0,39	
T4	17,60	78,54	36,33	0,30	0,28
	18,00	78,54	43,00	0,26	

Permeabilidade de corpos de prova cilíndricos extraídos.

	Amostras	Altura (cm)	Área (cm²)	Tempo Médio (s)	Permeabilidade (cm/s)	Permeabilidade média (cm/s)
T	Amostra 1	18,40	78,54	80,00	0,14	0,15
1	Amostra 2	18,30	78,54	75,33	0,15	
T	Amostra 1	18,40	78,54	99,00	0,11	0,11
2	Amostra 2	18,40	78,54	104,67	0,11	
T	Amostra 1	18,50	78,54	66,33	0,17	0,16
3	Amostra 2	18,30	78,54	72,67	0,16	
T	Amostra 1	18,30	78,54	127,67	0,09	0,09
4	Amostra 2	18,30	78,54	113,67	0,10	

Permeabilidade das placas de concreto segundo NBR 16416:2015.

Traço	Diâmetro do recipiente (mm)	Volume de água (L)	Tempo médio de infiltração (s)	Permeabilidade (mm/h)	Permeabilidade (cm/s)
T1	300	18	44	20834,90	0,58
T2	300	18	62	14786,00	0,41
T3	300	18	50,5	18153,10	0,50
T4	300	18	65	14103,60	0,39